

**2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA  
POZİTİF VE NEGATİF AŞIRI YÜKLERİN  
ÇATLAK İLERLEME HIZINA ETKİLERİ**

**Ramazan KALE**  
**Yüksek Lisans Tezi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Sivil Havacılık Anabilim Dalı**  
**Ocak-2005**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### 2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA POZİTİF VE NEGATİF AŞIRI YÜKLERİN ÇATLAK İLERLEME HIZINA ETKİLERİ

RAMAZAN KALE

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN  
2005, 94 sayfa

2024-T3 Alüminyum alaşımı ile yapılan bu çalışmada pozitif ve negatif aşırı yüklerinin yorulma çatlak ilerleme hızına etkileri araştırılmıştır. Sabit genlikli yorulma deneyi 0.11 gerilme oranında yapılmıştır. Değişken genlikli yorulma deneylerinde, sabit genlikli yorulma deneyi üzerine aşırı yükler uygulanmıştır. Sırasıyla pozitif tek aşırı yük, negatif tek aşırı yük, negatif tek aşırı yükü takip eden pozitif tek aşırı yük ve pozitif tek aşırı yükü takip eden negatif tek aşırı yük deneyleri yapılmıştır. Pozitif ve negatif aşırı yük oranları 1.4, 1.7 ve 2 olarak uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonunda, belli uzunluklar arasındaki çevrim sayıları hesaplanarak sabit genlikli yorulma deneyine göre değişken genlikli yorulma deneylerindeki gecikmeler ve hızlanmalar belirlenmiştir. Negatif tek aşırı yük durumunda hızlanma gözlenirken yapılan diğer deneylerde aşırı yük oranına ve aşırı yüklerin dizilişine göre farklı oranlarda gecikmeler olmuştur.

Anahtar kelimeler: Yorulma, çatlak ilerlemesi, alüminyum, sabit genlikli yükleme, pozitif ve negatif aşırı yük

**ABSTRACT****Master of Science Thesis****THE EFFECTS OF POSITIVE AND NEGATIVE OVERLOADS TO  
FATIGUE CRACK GROWTH RATE IN 2024-T3 ALUMINIUM ALLOY****RAMAZAN KALE****Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Aviation Program****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Dilek TURAN  
2005, 94 pages**

In this study realized with 2024-T3 Aluminium alloy, the effect of positive and negative overload on fatigue crack growth rate was investigated. The constant amplitude fatigue experiment was done at 0.11 stress ratio. In variable amplitude experiment overloads were superposed on top of constant amplitude fatigue experiment. Positive single overload, negative single overload, negative single overload following positive single overload, and positive single overload following negative single overload experiments were performed in the order given. Positive and negative overload ratios were applied as 1.4, 1.7, and 2. At the end of the experiments, by calculating the number of cycles between specified lengths, retardations and accelerations in variable amplitude fatigue experiments with respect to constant amplitude fatigue experiments were determined. While in the case of negative single overload acceleration was observed; in other experiments, retardations of different ratios were realized depending on overload ratio and the sequence of overloads.

**Keywords: Fatigue, crack growth, aluminium, constant amplitude loading, positive and negative overloading**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerek teorik gerekse deneysel kısmında yardımlarını gördüğüm sayın hocam Yard. Doç. Dr. Dilek TURAN'a uyarıcı ve yönlendirici desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışma arkadaşım Arş. Grv. Adem KARCI'ya yardımlarından dolayı ve deney numunelerinin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Uçak Teknisyeni İlhan KÖSE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmam boyunca bana sonsuz destek veren, nişanlım Arş. Grv. Devrim GÜN'e teşekkür ederim.

Ramazan KALE

Ocak-2005

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. YORULMANIN TARİHÇESİ</b> .....	<b>2</b>
2.1. Yorulmanın Tanımı.....	3
2.2. Yorulma Hasarının Aşamaları.....	6
2.2.1. Yorulma çatlak oluşumu ve başlangıcı.....	7
2.2.2. Yorulma çatlak ilerlemesi.....	9
2.2.3. Yorulma çatlak ilerleme hızı eğrisi (da/dN-ΔK).....	11
2.2.4. Metalik malzemelerde kırılma kontrolü ve kırılma mekanizmaları.....	13
2.3. Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler.....	28
2.3.1. Mikro yapının etkisi.....	29
2.3.2. Üretim sürecinin (imalat ve yüzey işlemleri) etkisi.....	31
2.3.3. Çevresel faktörler.....	32
2.3.4. Yük dağılımının etkisi.....	34
2.2.5. Parça geometrisi.....	36
2.4. Gerilme Oranının Çatlak İlerleme Hızına Etkisi.....	37
2.5. Çatlak Ucu Plastisitesi ve Çatlak Kapanması.....	40
2.6. Gerilme Şiddet Faktörü.....	43
2.7. Değişken Genlikli Yük Altında Yorulma Çatlak İlerlemesi.....	44

2.7.1. Daha karmaşık şekillerdeki değişken genlikli yükleme.....	46
2.7.2. Aşırı yük etkilerinin analizleri ve ilgili olgular .....	49
	<b><u>Sayfa</u></b>
2.7.3. Aşırı yük geciktirmesinin mekanizmaları.....	51
2.7.4. Yük etkileşimleri.....	53
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>58</b>
3.1. Deney Malzemesinin Özellikleri ve Geometrisi.....	58
3.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	60
3.3. Yapılan Yorulma Deneyleri.....	62
3.3.1 Sabit genlikli yorulma deneyi.....	62
3.3.2 Değişken genlikli yorulma deneyleri.....	62
3.3.3 Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler .....	63
<b>4. SONUÇLAR.....</b>	<b>65</b>
4.1. Sabit Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları.....	65
4.2. Değişken Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları.....	67
<b>5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI.....</b>	<b>75</b>
5.1. Sabit Genlikli Yorulma Deneyi .....	75
5.2. Değişken Genlikli Yorulma Deneyleri .....	76
5.2.1. Pozitif tek aşırı yük (OL) deneyi.....	76
5.2.2. Negatif tek aşırı yük (UL) deneyi.....	77
5.2.3. Birbirini takip eden pozitif tek aşırı yük-negatif tek aşırı yük (UL+OL, OL+UL1, OL+UL2, OL+UL3) deneyleri .....	78
<b>6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>83</b>
6.1. Genel Sonuçlar.....	83
6.2. Öneriler.....	84
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>85</b>

<b>EKLER.....</b>	<b>89</b>
-------------------	-----------

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Yapılardaki yorulmanın farklı bakış açılarıyla incelenmesi.....	6
2.2. Malzemelerde sabit yükleme (a) ve çevrimsel yükleme (b) esnasında oluşan kayma şekilleri .....	8
2.3. Çatlak başlangıcı için farklı merkezler.....	9
2.4. Yorulma çatlak ilerleme aşamaları.....	10
2.5. Yorulma çatlak ilerleme hızı, $da/dN-\Delta K$ eğrisinin bölgeleri ve bu bölgelerde etkili olan özellikler.....	12
2.6. Çatlaklı bir yapıdaki kalıntı mukavemet; yeni yapının ( $a=0$ ) mukavemeti $P_u=jP_s$ .....	15
2.7. Örnek yük dağılımları. (a) Gemiler ve uçakların tipik yük dağılımları; (b) Dönen mekanizmaların tipik yük dağılımları.....	16
2.8. Çatlak ilerleme eğrisi.....	18
2.9. Çatlak açılma modları.....	19
2.10. Metallerde oluşan kırılmanın üç ayrı mikro mekanizması.....	20
2.11. Keskin olmayan bir çatlak ucunda klivaj kırılmasının oluşumu. En alttaki şekilde kırık yüzeyin parlaklığı ve ışığı yansıtması resmedilmiştir .....	21
2.12. Sünek malzemelerin tek eksenli çekme deformasyonu.....	22
2.13. Düşük karbonlu bir çelikte taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilmiş sünek kırılmanın görüntüsü.....	23
2.14. Sünek kırılmanın gerçekleştiği çelik malzemede oluşmuş bir küresel kalıntının yüksek büyütme fraktografisi.....	23
2.15. Sünek metallerde boşluk oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesi.....	24
2.16. Çanak ve konili kırılmanın oluşum aşamaları.....	25
2.17. Yüksek saflıktaki çok kristalli bir bakır numunede boyun bölgesindeki iç çatlama .....	26
2.18. Sünek çatlak ilerleme mekanizması.....	26
2.19. $45^\circ$ lik zikzak şeklindeki sünek çatlak ilerlemesi.....	27

2.20. Yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı bir A710 çeliğinde, sünek çatlak ilerlemesinin optik mikroskopisi.....	28
2.21. Bir yapının yorulma ömrünü etkileyen faktörler .....	29
2.22. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi.....	30
2.23. Korozyonun etkili olduğu çevrenin $\sigma$ -N diyagramına ve çatlak ilerleme hızına etkisi.....	33
2.24. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği.....	35
2.25. Farklı gerilme oranları için gerilme genliği-ömür grafiği.....	35
2.26. Çentik civarındaki gerilme konsantrasyonunun değişimi.....	37
2.27. BS4360 yapısal çeliğine ait oda sıcaklığında ve 1-10Hz frekanslarında yorulma çatlak ilerlemesi grafiği. $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ .....	38
2.28. 2024-T3 alüminyum alaşımlı kaplamalı bir levhada gerilme oranının (R) yorulma çatlak ilerlemesine etkisi.....	39
2.29. Yorulma çatlak civarındaki plastik deformasyon bölgesi.....	41
2.30. Çatlak kapanmasının prensibi: (a) nominal K - $\sigma$ grafiği, (b) çatlak ucu plastisitesinin sebep olduğu kalıntı deformasyon, (c) K değerlerinin çatlak kapanmasına etkileri .....	42
2.31. Çekme yönünde gerilmeye maruz merkez çatlaklı levha.....	44
2.32. Değişken genlikli yükleme.....	44
2.33. 2024-T3 alüminyum alaşımlı merkezi çatlaklı bir levha için sabit genlikli yükleme ve sabit genlikli + ara sıra uygulanan aşırı yüklemenin çatlak ilerlemesine etkilerinin karşılaştırılması.....	45
2.34. Periyodik ve Periyodik olmayan değişken genlikli yükleme örnekleri ....	47
2.35. Bir nakliye uçağı için yük durumu.....	47
2.36. Aşırı yüklerin tekrarlanma periyotlarının çatlak ilerleme eğrisine etkileri.....	48
2.37. Yorulma çatlak ilerlemesinde aşırı yük etkilerinin gösterilmesi.....	51
2.38. Değişken genlikli bir yük çevrimindeki yük parametreleri.....	54



2.39. OL ve UL yüklemeleriyle oluşturulmuş basit değişken genlikli yükleme örnekleri: (a) tek OL; (b) blok OL; (c) periyodik olarak uygulanan blok OL; (d) tek UL; (e) blok UL; (f) periyodik olarak uygulanan blok UL; (g) tek OL-UL; (h) tek UL-OL; (i) periyodik olarak uygulanan blok OL-UL; (j) periyodik olarak uygulanan blok UL-OL .....	55
2.40. 2024-T3 alüminyum alaşımında OL yüklemesi sonrası oluşan gecikmeye UL yüklemesinin etkileri .....	57
3.1. Merkez çatlaklı (MT) 2024-T3 alüminyum alaşımlı malzemenin geometrisi .....	59
3.2. Merkez çatlaklı malzemenin çentik ölçüleri ve minimum yorulma ön çatlağının boyutu.....	60
3.3. Yorulma deneylerinde kullanılan Instron cihazı.....	61
3.4. Pozitif ve negatif aşırı yük terimlerinin şematik olarak gösterimi.....	64
4.1. 2024-T3 Alüminyum alaşımına ait sabit genlikli yükleme altında yapılan Sabit Genlik deneyine ait çatlak uzunluğu (2a)-çevrim sayısı (N) grafiği .....	66
4.2. 2024-T3 alüminyum alaşımına ait sabit genlikli yükleme altında yapılan Sabit Genlik deneyinin çatlak ilerleme hızı (da/dN)-gerilme şiddet faktörü ( $\Delta K$ ) grafiği .....	67
4.3. Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında pozitif tek aşırı yük (OL) uygulanarak yapılan yorulma deneyinin 2a-N grafiği .....	69
4.4. Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında negatif tek aşırı yük (UL) uygulanarak yapılan yorulma deneyinin 2a-N grafiği .....	70
4.5. Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında ard arda uygulanan negatif tek aşırı yük ve pozitif tek aşırı yük (UL+OL) yorulma deneyinin 2a-N grafiği .....	71
4.6. Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında	

ard arda uygulanan pozitif tek aşırı yük ve negatif tek aşırı yük (OL+UL1) yorulma deneyinin 2a-N grafiği .....	72
4.7. Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında pozitif tek aşırı yük ile hemen ardından uygulanan 1.7 oranında negatif tek aşırı yük (OL+UL2) yorulma deneyinin 2a-N grafiği.....	73
4.8. Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında pozitif tek aşırı yük ile hemen ardından uygulanan 1.4 oranında negatif tek aşırı yük (OL+UL3) yorulma deneyinin 2a-N grafiği.....	74
5.1. Aşırı yük plastik bölgesinin sebep olduğu gecikmenin gösterimi .....	76
5.2. 2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde R=0 oranında pozitif tek aşırı yük ve pozitif tek aşırı yükü takiben uygulanan negatif tek aşırı yük durumundaki çatlak ilerlemesinin karşılaştırılması .....	79
5.3. 2024-T3 alüminyum alaşımına ait, R=0.11 oranında gerçekleştirilen değişken genlikli yorulma deneyinde OL'den sonra değişik oranlarda (1.4, 1.7 ve 2) uygulanan UL'nin gecikmeye etkisinin gösterildiği 2a-N grafikleri.....	80

## ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1. 2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% olarak ağırlık) .....	58
3.2. 2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	59
3.3. Sabit genlikli yüklemdeki yük ve frekans değerleri.....	62
3.4. Değişken genlikli yüklemdeki yük değerleri.....	63
4.1. Değişken genlikli yorulma deneyleri sonucu oluşan gecikme ve hızlanmaların gösterilmesi .....	68
5.1. Sabit ve değişken genlikli yorulma deneyleri sonucu belirli çatlak uzunluklarındaki çatlak ilerleme hızı ve gerilme şiddet faktörlerinin gösterimi.....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Çatlak boyu (mm)
$a_0$	: Başlangıçta oluşan küçük boyuttaki çatlak (mm)
$a_D$	: Gecikme uzunluğu (mm)
$a_p$	: İzin verilebilir maksimum çatlak boyu (mm)
b	: Numune genişliği (mm)
B	: Numune kalınlığı (mm)
C, m, n	: Malzeme sabitleri
f	: Frekans (Hz)
f(g)	: Parça ve çatlak geometrisine bağlı olan düzeltme faktörü
g	: Kalıntı mukavemet güvenlik faktörü
H	: Zaman
h	: Çentik genişliği (mm)
j	: Güvenlik faktörü
K	: Gerilme şiddet faktörü ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_c$	: Kritik gerilme şiddet faktörü ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_{op}$	: Çatlak açılma gerilme şiddet faktörü ( $MPa\sqrt{m}$ )
$K_t$	: Gerilme konsantrasyon faktörü
N	: Çevrim sayısı
$N_A$	: Hızlanma çevrim sayısı
$N_{BL}$	: Sabit genlikli yük çevrim sayısı
$N_D$	: Gecikme çevrim sayısı
$N_{OL}$	: Aşırı yük çevrim sayısı
$N_{top}$	: Toplam çevrim sayısı
OL	: Pozitif Aşırı yük
OLR	: Pozitif Aşırı yük oranı
P	: Yük (kN)
$P_a$	: Ortalama servis yükü (kN)

$P_m$	: Ortalama gerilme (kN)
$P_{max,BL}$	: Maksimum sabit genlikli yük (kN)
$P_{min,BL}$	: Minimum sabit genlikli yük (kN)
$P_{OL}$	: Maksimum pozitif aşırı yük (kN)
$P_p$	: İzin verilebilir minimum kalıntı mukavemet (kN)
$P_{res}$	: Kalıntı mukavemet (kN)
$P_s$	: Tahmin edilen en yüksek servis yükü (kN)
$P_u$	: Dizayn mukavemeti (kN)
$P_{UL}$	: Maksimum negatif aşırı yük (kN)
$R$	: Gerilme oranı
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_{max}$	: Maksimum gerilme (MPa)
$\sigma_{min}$	: Minimum gerilme
$\sigma_{op}$	: Çatlak açılma gerilmesi (MPa)
$\Delta a$	: Çatlak ilerleme aralığı (mm)
$\Delta K_{eff}$	: Efektif gerilme şiddet faktörü ( $MPa\sqrt{m}$ )
$\Delta N$	: Belli mesafeler arasındaki çevrim sayısı
$\Delta K_{th}$	: Eşik gerilme şiddet faktörü ( $MPa\sqrt{m}$ )
$\Delta P_{BL}$	: Maksimum sabit genlikli yük ile minimum sabit genlikli yük arasındaki fark
$\Delta\sigma$	: Gerilme aralığı (MPa)
$U$	: Gerilme şiddet oranı
$UL$	: Negatif Aşırı yük
$ULR$	: Negatif Aşırı yük oranı
$W$	: Numune genişliği (mm)
ASTM	: American Society for Testing Materials
LEFM	: Lineer elastik kırılma mekaniği
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Elektron Microscope)

## 1.GİRİŞ

En yüksek değeri statik kırılma büyüklüklerine ulaşmasa bile, zamanla değişen ve tekrarlanan zorlamaların, malzemede kırılmaya kadar gidebilen olumsuz etkilerine yorulma denir [1]. Geçmişte birçok kazalara neden olduğundan üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış ve halende yapılmaktadır. Bununla beraber çok değişik etkenlerin rol oynadığı bu karışık olayı yakından tanımakla olası yorulma kırılmalarını önlemek mümkündür [2].

Uçak yapılarındaki komponentlerin büyük bir çoğunluğu, gerçek çalışma koşullarında rassal olarak değişen, değişken genlikli yüklere maruz kalmaktadır. Bir uçağın uçuşu dikkate alındığında uçak komponentleri kalkış, inişte piste ilk çarpma ya da havada maruz kalınan düşey rüzgarlar sebebiyle aşırı yüklere maruz kalabilirler. Bu aşırı yüklerin sırası, şekli ve büyüklüğü yapının yorulma davranışlarını etkilemektedir. Örneğın sabit genlikli yükleme üzerine uygulanan pozitif tek aşırı yük, aşırı yük oranına bağlı olarak çatlak ilerlemesinde yavaşlamaya sebep olurken negatif tek aşırı yük çatlak hızlandırmaktadır. Malzemenin gerçek çalışma şartlarında karşılaşılabileceği bu tür aşırı yükler göz önünde bulundurularak yapılan yorulma deneyleri ile çatlak ilerleme tahminleri yapılmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak yorulmanın tarihçesinden bahsedilmiştir. Daha sonra yorulmayla ilgili genel tanımlar, çatlak ilerleme aşamaları, kırılma mekanizmaları, yorulma olayına etki eden faktörler, çatlak ucu plastisitesi ve çatlak kapanması son olarak ta değişken genlikli yorulmada aşırı yüklerin çatlak ilerlemesine etkileri ele alınmıştır.

DeneySEL çalışmalar bölümünde ise uçak yapılarında sıklıkla kullanılan 2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde pozitif tek aşırı yük, negatif tek aşırı yük, negatif tek aşırı yükü takip eden pozitif tek aşırı yük ve pozitif tek aşırı yükü takip eden negatif tek aşırı yük deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucu oluşan çatlak ilerleme hızları sabit genlikli yorulma deneyindeki çatlak ilerleme hızıyla karşılaştırılmıştır.

## 2. YORULMANIN TARİHÇESİ

Metallerde yorulma, insanoğlunun dikkatini ilk olarak 19. yüzyılda çekmiştir ve tek başına uygulandığı zaman yapıya zarar vermeyen yük çevrimlerinin çok sayıda tekrarlanması sonucu oluşan bir kırılma olgusunun farkına varılmıştır [3,4]. 1860-1870 döneminde, demiryollarında meydana gelen kazalar, İngiltere’de yılda ortalama 200 kişinin hayatını kaybetmesine neden oluyordu. Bu nedenle, rayların, tekerleklerin ya da aksların kırılması sonucu meydana gelen bu kazaların nedenlerinin belirlenmesi için çalışmalara başlandı [3]. 19. yüzyılda, yorulma olayının gizemli olduğu ve yorulma kırığında bir plastik deformasyon gerçekleşmediği düşünülmüştür. Sistematik yorulma testleri, özellikle August Wöhler tarafından yapılmıştır ve yapının geometrisinde küçük ve keskin uçlardan kaçınılması gerektiğinin farkına varılmıştır. Ancak malzemede oluşan yorulma olgusu hala gizemliliğini koruyordu [4]. Havacılığın ilk yıllarında da, uçak yapısının ömrü tasarımı göz önüne alınan bir parametre değildi. Çünkü o yıllarda tasarlanan uçaklarda, uçağın kaybedilmesine neden olan asıl sebepler, metal yorgunluğu değil yanlış ya da eksik tasarımdan ve kullanımdan kaynaklanan aksaklıklardı. Yani, o yıllarda bir uçağın düşme sebebi hiçbir zaman metal yorgunluğu olarak rapor edilmemişti. Ya da hiçbir uçak için, yapısındaki yorulma kaynaklı çatlakların ekonomik onarım limitlerini aşması nedeniyle servis dışı bırakılma kararı verilmemişti. Havacılığın ilk yıllarında, bir uçağın kaybına neden olabilecek etkenler; aşırı statik yükleme, savaş kayıpları, motor arızaları, kontrol sistemlerindeki arızalar ve pilotaj hataları olarak sıralanmaktaydı [5]. Yorulma olayının bir malzeme problemi olarak dikkate alındığı ilk temel adım, Ewing ve Humfrey tarafından 1903 yılında atılmıştır. Ewing ve Humfrey, kayma bantlarında mikro çatlaklar şeklinde başlayan yorulma çatlak oluşumunun görüldüğü bir mikroskobik çalışma yapmışlardır. 20. yüzyılda yorulma olayıyla ilgili bir çok gelişme olmuştur. 1951 yılında Peterson malzemeyle ilgili bir olgu olan yorulma ile ilgili tarihsel fikirlerden ve 1930’lu yıllarda Gough ve çalışma arkadaşlarının yaptığı mikroskobik çalışmalardan bahsetti. Çatlak başlangıcı kayma bantlarında oluşur ve çatlağın başlamasına sebep olan küçük kaynakların bir veya daha fazlası ilerlemeye başlar. Bu ilerleme, çekme gerilmelerine dik

yönde ve tanelerin etrafını zikzak şeklinde dolanarak ilerleyen çatlak içerisinde devam eder. Şu hatırlanmalıdır ki; kırılmış yüzey genellikle normal bir gerilme alanını izlemesine rağmen, hasarın mikroskobik kaynağı kesmedir. Timoshenko'nun 1954'te yaptığı çalışmada ise daha çok, çentiklerin etrafındaki gerilme yoğunlaşmaları ve gerilme dağılımlarının önemi üzerinde duruldu. Timoshenko'ya göre, bu önem, 19. yüzyılın sonlarında tasarım mühendisleri tarafından anlaşıldı ve 20. yüzyılın başlarında ise daha ayrıntılı incelenmeye başlandı [4]. Demiryollarındaki kazaların nedenleriyle ilgili çalışmalarda bulunan Anderson, 1969'da çeşitli raporlar hazırladı. Bu kazaların bazılarının nedeni kötü tasarımıdır. Ancak, daha sonraları bu tip hasarların, yapıda önceden mevcut bulunan küçük çatlakların zamanla ilerleyerek yapının çatlak bulunan kesitte artık yük taşıyamaması olduğu fikri yaygınlaşmıştır [3].

20. yüzyılda yorulmayla ilgili yapılan çalışmalar muazzamdır. John Mann yorulmayı kaynak gösterdiği kitaplar yayınlamış ve daha sonra çalışmalarına devam etmiştir. Bu çalışmaların sonunda yaklaşık 100.000 kaynağa ulaşmıştır. Halbuki 19. yüzyılda kaynak sayısı 100'den azdı. Yayın sayısının fazla olması bu problemle ilgili henüz bir çok sorunun olduğunu göstermiştir. Ayrıca yorulma hasarıyla ilgili yapılan çalışmaların ve düzenlenen konferansların 21. yüzyılda da devam etmesi, bu sorunla ilgili problemlerin hala tam olarak çözülemediğini göstermektedir.

## **2.1. Yorulmanın Tanımı**

Birçok makine parçası ve yapı elemanı kullanılma esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışmaktadır. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. "YORULMA" adı verilen bu olay ilk defa 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır [6]. Yorulma hasarına uğrayan parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçaları gösterebiliriz. Otomotiv ve uçak



endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların % 90'ı yorulma sonucunda olmaktadır [6,7].

Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeydeki bir pürüzde, çentikte, çizikte, kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar [6]. Çatlak, oluşuktan sonra tekrar eden gerilme altında ilerler. Sonunda, kalan kısım o kadar küçülür ki yükü taşıyamayacak hale gelir ve aniden kopar. Bu durumda iki farklı yüzey yapısı oluşur. Bunlar; çatlak ilerledikçe birbirine sürtünen yüzeylerin oluşturduğu düzgün yüzeyli bölge ve kalan kısmın yük taşıyamayacak küçüklüğe ulaşmasından sonra kırılmayla meydana gelen kaba yüzeyli bölgelerdir [7].

Yorulma olayı tamamen mekanik yükler altında olabileceği gibi, yüksek sıcaklık ile çevrimsel gerilmeler birlikte uygulandığında sürünme yorulması, sıcaklık değişimlerinin mekanik gerilmelerle beraber etkimesi sonucunda ısıl-mekanik yorulma, tekrarlı yüklerin korozyon aktif çevre koşullarında uygulanması sonucunda oluşan korozyon yorulması, birbiri üzerinde kayan ve sürtünen yüzeylerin arasında aşınma yorulması, yuvarlanan yüzeylerin temas noktalarında temas yorulması, şeklinde de oluşabilir. Makine ve yapısal parçalarda oluşan hasarların çoğu yukarıdaki yorulma hasarı tiplerinden biriyle oluşur [8].

Çatlak oluşumu için genellikle şu üç ana faktör gereklidir:

- Yeteri derecede yüksek bir maksimum çekme gerilmesi
  - Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması
  - Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı
- [6].

Bu ana faktörlerin yanında çok sayıda yan faktörlerde sayılabilir; örneğin yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, gerilim konsantrasyonu, frekans ve mikro yapı gibi.

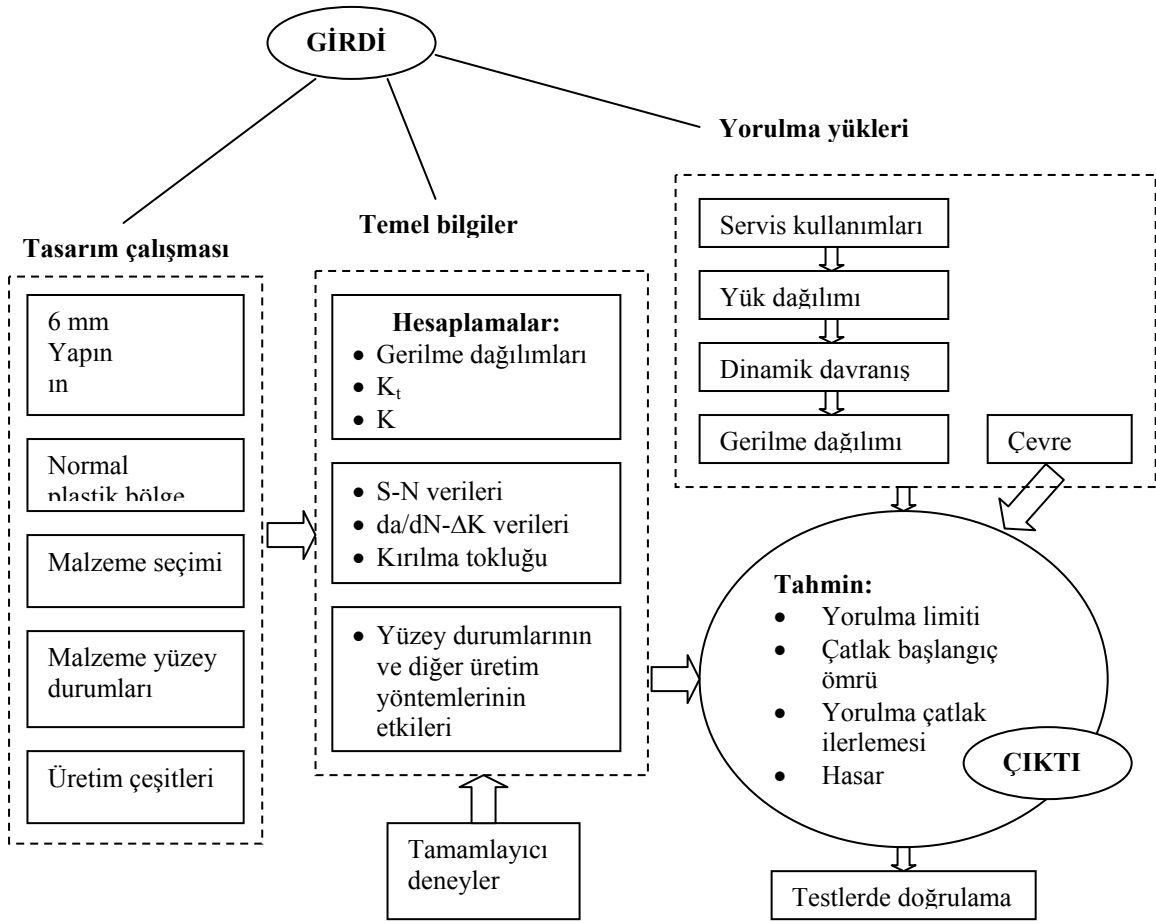
Yukarıda sayılan faktörler göz önünde bulundurulacak olursa, metalik parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü artırmak için çok iyi bir dizayna gerek vardır. Ancak küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney

sonuçlarını karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür. Laboratuarda, standart boyut ve belirli yüzey özelliğindeki numuneye, belirli türde sabit gerilmeler uygulanarak deney yapılır. Endüstride kullanılan parçada ise koşulların hepsi değişiklik gösterirler. Karmaşık olmalarından dolayı bu koşulların analizi de güçtür. Bu nedenle yorulma deneyi sonuçları, mühendislik uygulamalarında çekme deneyi sonuçları gibi kesin ve tam güvenilir şekilde kullanılamazlar. Yorulma deneyi sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur.

Son yıllarda özellikle önemli parçaların yorulma davranışlarını tespit etmek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece daha güvenilir sonuçlara ulaşılmaktadır [6].

Yorulma hasarları, maddi açıdan da önemli kayıplara sebep olmaktadır. Maddi ve manevi felaketleri önlemek için emniyet çok önemlidir. Sonuç olarak yorulmaya karşı dizayn kavramı sanayi, araştırma enstitüleri, üniversiteler ve sorumlu otoriteler tarafından toplumun bu tür felaketlerden korunması adına ilgi görmüştür. Bu kavram, çeşitli dizayn seçeneklerini içine alır. Tabi tecrübe ve mühendislik kararlarının gerekliliği de kaçınılmazdır. Yorulma tahminleri çatlak ilerlemesi ve yorulma ömrüyle ilgili bilgiler için gereklidir [9].

Tahminler çok sayıda prosedürün çıktısıdır ve Şekil 2.1, çeşitli bakış açılarını kapsayan bir senaryoyu gösterir. Girdi problemleri üç kategoride gerçekleşir : (1) tasarım çalışması, (2) temel bilgiler, (3) yorulma yük dağılımı. Her bir kategori, bir çok ayrı problemi kapsar. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi problemin bütünü, yapısal tasarım, malzeme tipi, üretim çeşitleri, yük dağılımı ve çevre etkilerine bağlı olarak çok karışık olabilir [4].



Şekil 2.1. Yapılardaki yorulmanın farklı bakış açılarıyla incelenmesi [4]

## 2.2. Yorulma Hasarının Aşamaları

Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeydeki bir pürüzde, çentikte, çizikte, kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak, oluşuktan sonra tekrar eden gerilme altında ilerler. Sonunda, kalan kısım yükü taşıyamayacak hale gelir ve aniden kopar [6,7]. Yorulma kırılmaları plastik şekil değişiminin, çekme gerilmesinin ve çevrimsel gerilmelerin eş zamanlı etkisi sonucunda meydana gelir. Yani yorulma çatlaklarının başlayıp ilerlemesi için bu üç faktöründe aynı anda etkili olması gerekir. Çevrimsel gerilme ve plastik şekil değişimi çatlak oluşumunu başlatır, çekme gerilmesi de çatlak ilerlemesini meydana getirir [10].

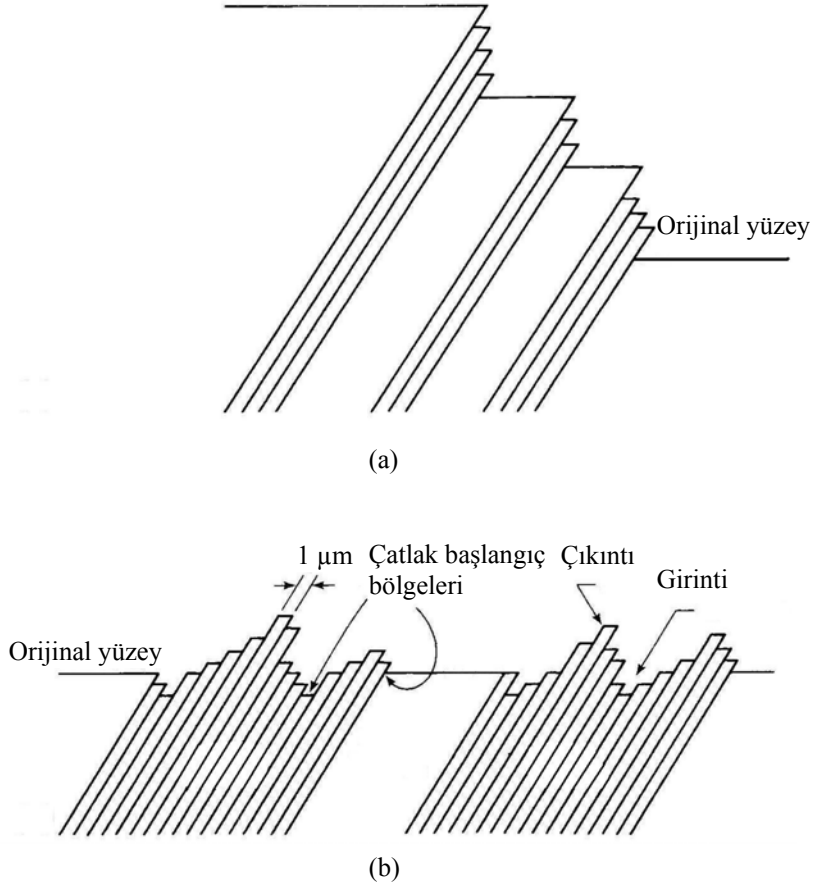
Yorulma hasarı üç aşamada incelenir:

- Yorulma çatlak oluşumu ve başlangıcı
- Çatlağın kritik bir boyuta kadar ilerlemesi
- Kırılma [9].

### **2.2.1. Yorulma çatlak oluşumu ve başlangıcı**

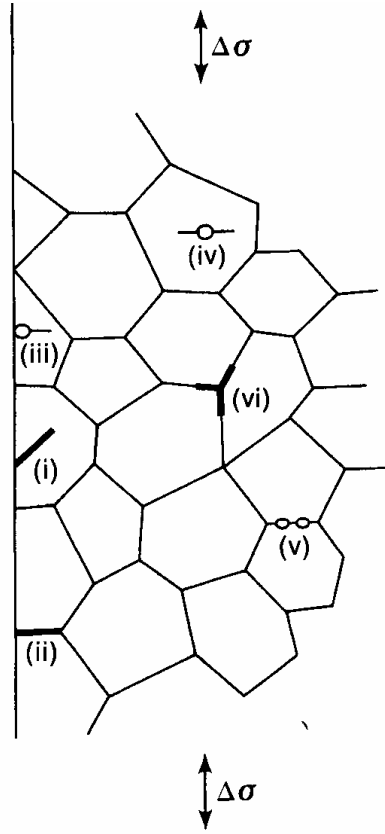
Farklı yük ve çevre koşullarında yapılan laboratuvar çalışmalarında gerçekleşen yorulma kırılmaları ile servis sırasında yapı ve parçalarda meydana gelen yorulma kırılmalarının analizinden iki temel çatlak başlangıç durumunun olduğu belirlenebilir. Buna göre çatlak, ya yüzey gibi oldukça homojen bir gerilme bölgesinden ya da kalıntı, süreksizlik gibi makro boyuttaki kusurlardan kaynaklanan gerilme yığılma bölgelerinden başlar. Fakat çatlak oluşum süreci, bölgesel gerilme ve deformasyon bölgeleri göz önüne alındığında, her iki durumda da çok benzerdir [11]. Malzemede bulunan çatlak, çentik, kalıntı, boşluk ve ani kesit değişimlerinin etrafındaki gerilmeler, parçanın maruz kaldığı dış gerilmelere göre daha büyüktür. Bu gerilmelerin etkisiyle yapı içerisinde, plastik şekil değişimi meydana gelir.

Bir metal parçada maruz kalınan elastik sınır altındaki yüklerden dolayı mikro yapı içerisindeki mevcut hatalar (dislokasyonlar) bölgesel olarak hareket ederler ve Şekil 2.2’de görülen kayma bantlarını oluştururlar. Kayma bantlarının oluşumu sonucu yüzeydeki girinti ve çıkıntılar gerilim yoğunlaşmasına sebep olurlar. Gerilme yığınlarının etkisiyle yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Mikro çatlaklar zamanla büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar [10].



**Şekil 2.2.** Malzemelerde sabit yükleme (a) ve çevrimsel yükleme (b) esnasında oluşan kayma şekilleri [12]

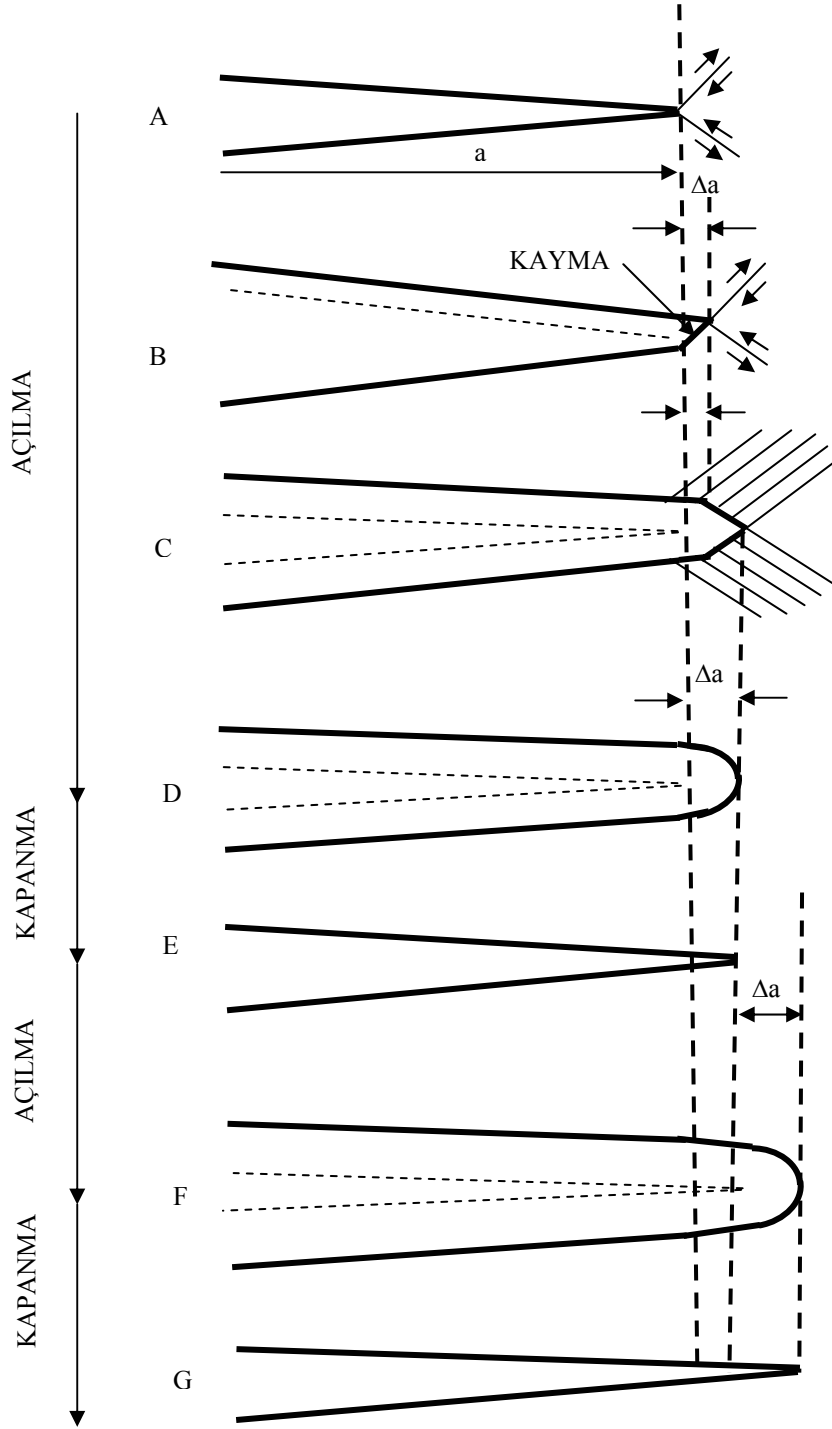
Şekil 2.3, değişik çatlak başlangıç merkezlerini göstermektedir. Bunlar; (i) taneleri kesen, (ii) taneler arası, (iii) yüzeyde bulunan kalıntı veya boşluk, (iv) malzeme içerisindeki kalıntılar ve (v) tane sınırlarındaki boşluklarda çatlak başlangıç merkezleri olarak gösterilmektedir. Bunların ilk ikisi kayma bantlarının oluşturduğu yüzey çatlaklarıdır, üçüncüsü ise bazı ticari alaşımlarda gözlemlenir. Malzeme yapısında bu süreksizliklerin varlığı yorulma çatlak oluşma ihtimalini arttırır [12].



Şekil 2.3. Çatlak başlangıcı için farklı merkezler [12]

### 2.2.2. Yorulma çatlak ilerlemesi

Malzemede oluşan yorulma çatlakları, tekrarlı gerilmelerin ve şekil değişimlerinin etkisiyle ilerleyebilir. Çatlakların ilerleme yönü ve ilerleme hızı bölgesel gerilmelere ve malzemenin çatlak ucundaki yapısına bağlıdır [10]. Tek eksenli yükleme durumunda maksimum kayma gerilmesinin normali uygulanan gerilme ile 45 derecelik bir açı yapar. Böylece mikro çatlaklar, 45 derece açıyla yönlendirilmiş kristallerdeki aktif kayma bantları boyunca başlar. Meydana gelen çevrimsel deformasyonla, oluşan çatlakların birkaçı başlangıçta kayma bantları boyunca ilerler ve zamanla yönünü değiştirerek yükleme eksenine dik hale gelir. Yorulma çatlakları oluştuğundan sonra çevrimsel olarak meydana gelen kayma hareketleri sonucunda ilerleyebilir [12]. Çevrimsel kayma hareketleri sonucunda oluşan çatlak ilerlemesinin aşamaları Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yorulma çatlak ilerleme aşamaları [8]

Çok düşük yüklerde bile çatlak ucunda yüksek gerilme yığılmasından kaynaklanan plastik deformasyon bulunur. Plastik deformasyon, Şekil 2.4'teki B

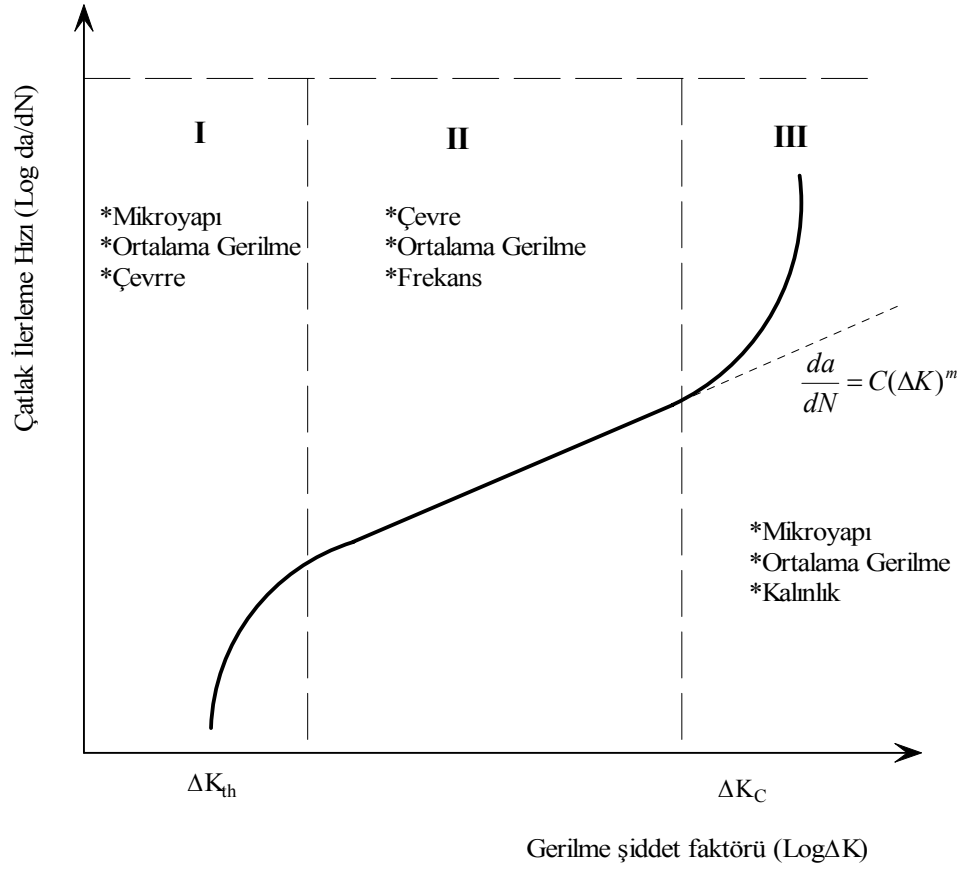
aşamasında gösterildiği gibi atomik düzlemlerin kaymasıyla oluşur. Kayma hareketi ile çatlak açılırken boyu da artar. Kayma hareketi daha sonra Şekil 2.4'teki C aşamasında gösterilen diğer düzlemde meydana gelir. Deformasyon sertleşmesi ve artan gerilme diğer paralel kayma düzlemlerini aktif hale getirir. Sonuçta çatlak ucu Şekil 2.4'teki D aşamasındaki gibi körelir. Çevrimdeki yükün arttığı kısımda çatlak  $\Delta a$  kadar ilerler. Çatlak ucunda maruz kalınan gerilmelerin etkisiyle etrafı elastik bölge ile çevrelenmiş bir plastik bölge oluşur. Elastik bölge, yükün azaldığı kısımda plastik bölgeye basma yönünde gerilmeler uygular. Basma gerilmesi çatlak ucundaki akma gerilmesinin üzerinde bir değere sahiptir ve Şekil 2.4'te E aşamasında gösterildiği gibi çatlağın kapanmasına ve çatlak ucunun tekrar keskinleşmesine yol açar. A-E ve F-G aşamaları sırasında uygulanan yüke göre çatlak benzer şekilde körelir ve keskinleşir [8,13].

### 2.2.3. Yorulma çatlak ilerleme hızı eğrisi ( $da/dN-\Delta K$ )

Şekil 2.5'te gösterilen Yorulma Çatlak İlerleme Hızı Eğrisi ( $da/dN-\Delta K$ ) sigmoidal bir şekle sahiptir ve eğride çeşitli etkiler ve çatlak uzamasının mekanizmalarına bağlı olarak üç bölge vardır. Grafiğin I. bölgesinde mikro yapı, ortalama gerilme, çevre şartlarının etkisi büyüktür ve çatlak ilerleme değerinin altında bir eşik değeri ( $\Delta K_{th}$ ) vardır. Bu değer üzerinde çatlak ilerleme oranı  $\Delta K$  değerine bağlı olarak hızlı bir şekilde yükselir [14]. Eşik gerilme şiddet faktörü değeri ( $\Delta K_{th}$ ), altında çatlak ilerlemesi oluşmamakta veya çatlak, ölçülemeyecek kadar yavaş ilerlemektedir. Yorulma nedeniyle kırılan yüzeyler incelendiğinde bu bölgede yorulma çizgileri görülmez. Çelikler için gerilme şiddet faktörü eşik değeri, alüminyum alaşımlarına göre daha yüksektir ve bu değerler gerilme oranına ( $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ ) bağlı olarak değişmektedir. Gerilme oranı arttıkça gerilme şiddet faktörü eşik değeri azalır. Genellikle yapıların ve parçaların çalıştığı II. bölgede eğri lineer olarak değişmektedir. II. bölgede mikro yapı, çevre, ortalama gerilme ve frekans, çatlak ilerleme hızını etkilemektedir. II. bölgede çatlak ilerleme davranışı genellikle lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) kavramlarının kullanılmasıyla tanımlanmaktadır. Lineer elastik kırılma mekaniği çatlak ucu civarında gerilme değeri ve dağılımının, uygulanan gerilme, çatlak



boyutu-şekli ve çatlaklı parçanın malzeme özellikleri arasındaki ilişkinin belirtilmesinde kullanılır.



**Şekil 2.5.** Yorulma çatlak ilerleme hızı,  $da/dN$ - $\Delta K$  eğrisinin bölgeleri ve bu bölgelerde etkili olan özellikler [12]

Son olarak yüksek  $\Delta K$  değerlerinin bulunduğu III. bölgede, çatlak ilerleme hızı çok yüksek ve yorulma ömrü çok kısadır. Bu bölgede mikro yapı, ortalama gerilme ve malzeme kalınlığının etkisi fazla iken çevrenin etkisi daha azdır [15]. III. bölgede çatlak ilerleme hızı eğrisi doğrusallığını tamamen kaybeder ve belli bir asimtota yaklaşır. Böylece maksimum gerilme şiddet faktörü ( $K_{max}$ ), kritik gerilme şiddet faktörüne ( $K_c$ ) eşit olur [14].

Kararsız ve hızlı çatlak ilerlemesinin gerçekleştiği III. bölge, toplam çatlak ilerleme ömrünü önemli derecede etkilemediğinden bazı mühendislik uygulamalarında ihmal edilmektedir. II. bölgeden III. bölgeye geçiş noktasındaki davranış, malzeme akma mukavemetine, gerilme şiddet faktörüne ve gerilme oranına bağlıdır [15].

Çatlak ilerleme oranı eğrisiyle ilgili kısmen ya da tamamen deneysel çalışmalarda toplanan verilerin formülizasyonlarının kullanıldığı ‘çatlak ilerleme kuralları’ adı altında birçok tanımlamalar yapılmıştır. En çok bilinen iki tanesi aşağıda gösterilmiştir:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad \text{Paris eşitliği} \quad (2.1)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1-R)(K_c - \Delta K)} \quad \text{Forman eşitliği} \quad (2.2)$$

Paris eşitliği Şekil 2.5’te gösterilen çatlak ilerleme eğrisinde sadece lineer olan II. Bölgeyi tanımlar. Forman eşitliği ise Paris eşitliğinden türetilmiş olup III.bölgeyi de inceler.

Ayrıca  $\Delta K$ - $da/dN$  eğrisinin tamamını kapsayan bir eşitlik aşağıda verilmiştir. Bu eşitlikte gösterilen  $n_1$ ,  $n_2$  ve  $n_3$  değerleri deneysel olarak belirlenmektedir [14].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \left[ \frac{1 - \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta K}\right)^{n_1}}{1 - \left(\frac{K_{max}}{K_c}\right)^{n_2}} \right]^{n_3} \quad (2.3)$$

#### 2.2.4. Metalik malzemelerde kırılma kontrolü ve kırılma mekanizmaları

Tasarımcılar, Metalurji Mühendisleri, İmalatçılar, Bakım Mühendisleri ve Kontrolörler kırılma hasarlarından dolayı oluşabilecek felaketleri önlemek için bir araya gelerek yapıların kırılma kontrollerini planlarlar. Kırılma, çeşitli yapısal hasar modlarından (bükülme, kırılma, aşırı plastik deformasyon) sadece birisidir. Hasarsız bir yapıda kırılma, aşırı yükten dolayı çok nadir oluşur. Genellikle bunun sebebi, yapısal süreksizlik veya çatlaklardır. Bu çatlaklar tekrarlanan gerilmeler veya normal servis yüklerinde bir süreksizlik ya da gerilme konsantrasyonu sonucu ortaya çıkar ve servis yüklerinden dolayı zamanla ilerler. Çatlaklar ve

yapısal bozukluklar yapının mukavemetini zamanla azaltır. Böylece çatlağın ilerlemesi sonucu yapının mukavemeti zamanla normal servis yüklerini taşıyamayacak seviyeye kadar düşer ve en sonunda kırılma olayı gerçekleşir. Kırılma kontrolleri, parçaların çalışmaları esnasında oluşabilecek en yüksek yükler göz önüne alınarak yapılan deneysel çalışmalarla kırılma olayını önlemek amacıyla yapılır. Eğer kırılma olayı önlenemezse, mukavemet belli bir emniyet seviyesinin altına düşmemelidir. Yapı mukavemetinin müsaade edilebilir bir sınır değerine düşmeden, çatlağın belirli bir boyuta kadar ilerlemesinin önlenmesi gerekir. Müsaade edilebilir çatlak boyutunun ve emniyetli çalışma ömrünün belirlenebilmesi için yapısal mukavemetin çatlaklardan ne şekilde etkilendiğinin araştırılması gerekir. Bunun için ilk olarak çatlakların oluşabileceği bölgeler tespit edilmelidir. Daha sonra yapılan analizler bize çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olan çatlak ilerleme süresi ve yapısal mukavemetle ilgili bilgiler vermelidir. Bu tipteki bir analiz hasar toleransı analizi olarak adlandırılır. Hasar toleransı, bir yapının, çatlakların giderilebileceği uygulamaya kadar geçen süre içinde çatlaklara ve kusurlara dayanabilme özelliğiyle ilgili bir unsurdur. Çatlak bir yapıda veya parçada çatlak giderme işlemi tamir ya da parçanın değiştirilmesi şeklindedir. Dizayn aşamasında, planlanan ekonomik servis ömrü süresince çatlakların tehlikeli olmaması için daha dirençli malzemeler seçilir ya da yapısal dizaynlar geliştirilir. Alternatif olarak çatlakların belirlenebilmesi ve alınabilecek önlemlerle ilgili yapılan periyodik kontroller çizelgeler halinde gösterilebilir. Hasar toleransında çatlak ilerleme süresinin hesaplanmasında parçayı değiştirme süresi, kontrol aralığı ya da kontrol tipi gibi unsurlar göz önüne alınmalıdır. Kontroller tahribatsız muayene teknikleriyle yapılabilir. Bu yöntemde parçalarda ulaşılması zor olan bölgelere ulaşmak kolaydır.

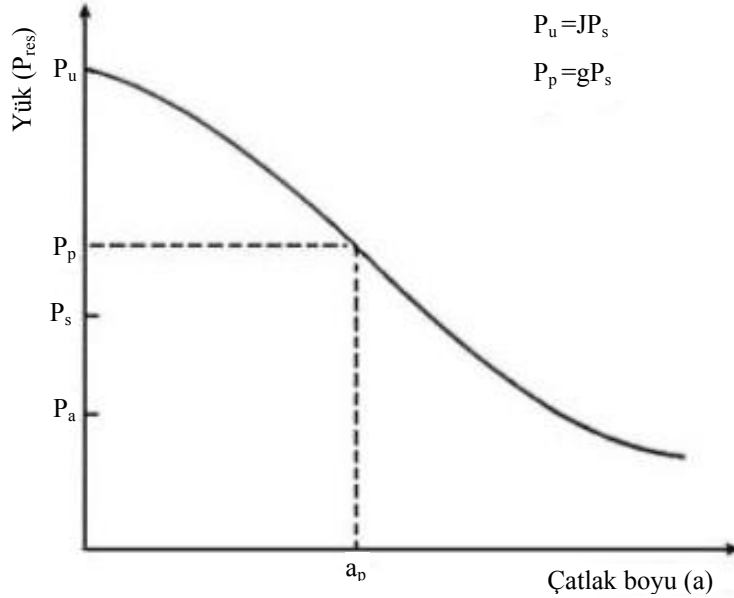
Hasar toleransının aşağıda belirtildiği gibi iki amacı vardır

- Çatlakların mukavemete etkisi
- Zamanın bir fonksiyonu olarak çatlak gelişimi

Şekil 2.6, çatlak boyunun mukavemete etkisini grafiksel olarak göstermektedir.

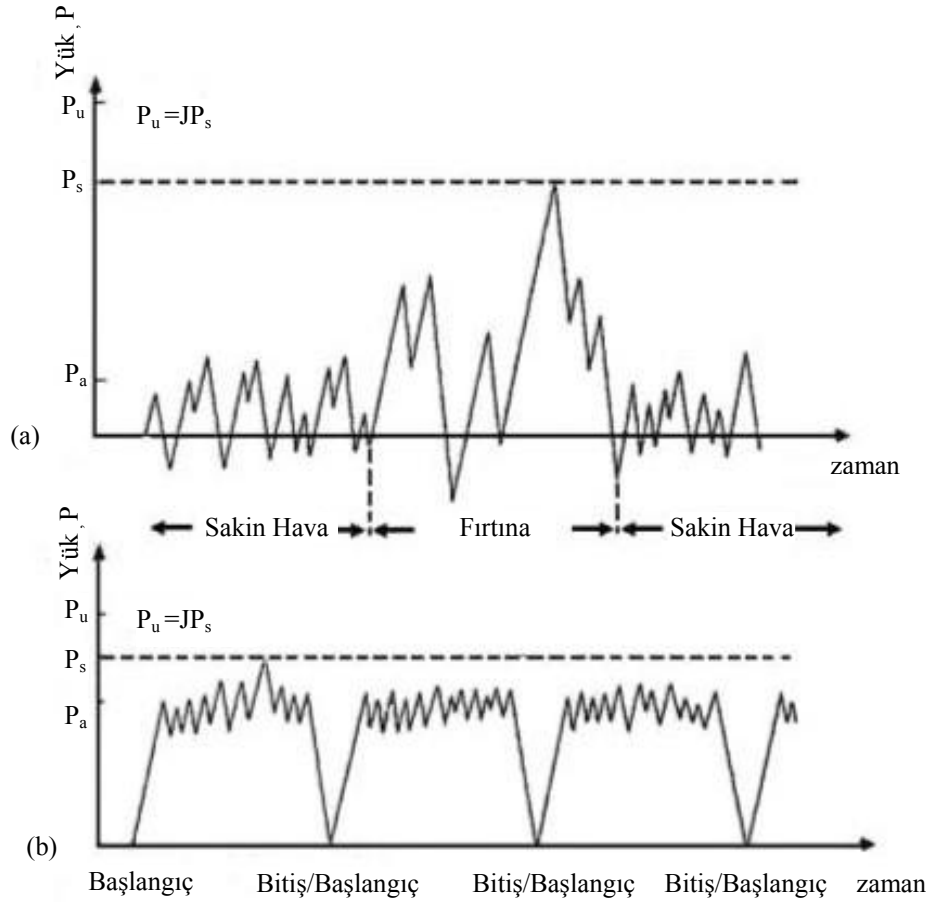
Kırılma mekaniğinde çatlak boyu genellikle  $a$  ile, mukavemeti temsil eden yük ise  $P$  ile gösterilir. Yeni bir yapı farz edelim ve bu yapıda önemli bir hata

olmasın ( $a=0$ ). Bu durumdaki mukavemet  $P_u$  ile gösterilir. Bu, dizayn mukavemetidir.



**Şekil 2.6.** Çatlaklı bir yapıdaki kalıntı mukavemet; yeni yapının ( $a=0$ ) mukavemeti  $P_u = jP_s$  [8]

Kırılma olayının bu yük değerinde olması gerekir. Her dizaynda bir güvenlik faktörü kullanılır. Örneğin tahmin edilen en yüksek servis yükü  $P_s$  ise, yapı  $jP_s = P_u$  eşitliği sağlanacak şekilde dizayn edilir. Bu eşitlikte  $j$ , güvenlik faktörünü ifade etmektedir. Tasarımcılar yapıyı, yükün  $P_u$  olduğu durumdaki maksimum çekme mukavemetine eşit ya da daha düşük gerilmelere dayanabilecek şekilde dizayn ederler.  $j$ 'nin değeri 1.5 ile (uçaklar) 3 (birçok sivil mühendislik yapıları) arasında değişir. Şu vurgulanmalıdır ki,  $P_s$  en büyük servis yüküdür. Eğer servis yükü değişirse yük çoğu zaman  $P_s$ 'den daha küçük değerlerde olur. Örneğin vinçlerdeki, köprülerdeki, gemilerdeki ve uçaklardaki yükler genellikle  $P_s$ 'den daha düşüktür. Ancak sıra dışı durumlarda (örneğin fırtına) yük  $P_s$  değerine ulaşır. Bazı yapılarda ise yükler (boru hatları, basınçlı kaplar, dönen mekanizmalar) Şekil 2.7'de gösterildiği gibi  $P_s$  değerine daha fazla yaklaşırlar ve yük seviyeleri birbirleriyle hemen hemen aynıdır.



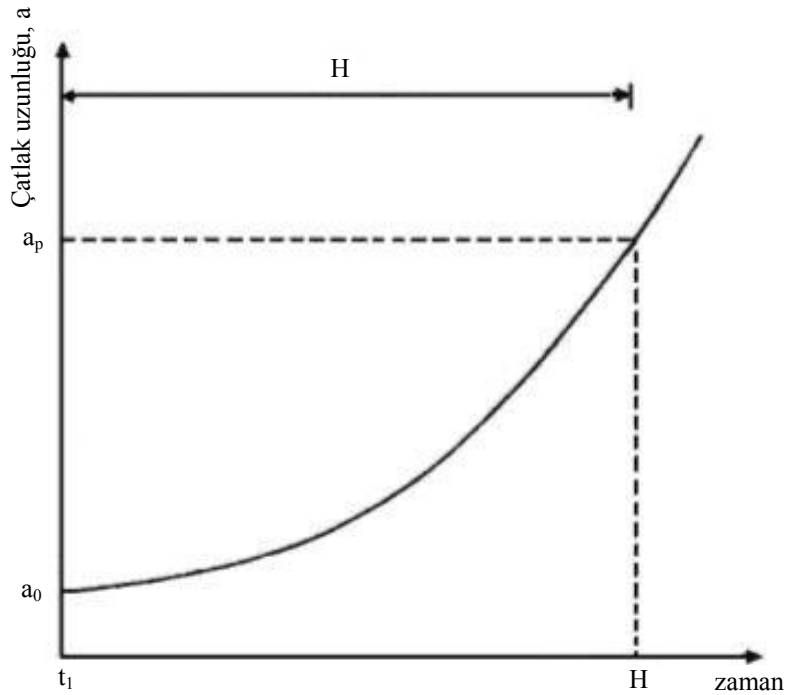
**Şekil 2.7.** Örnek yük dağılımları. (a) Gemiler ve uçakların tipik yük dağılımları; (b) Dönen mekanizmaların tipik yük dağılımları [8]

Yeni yapı  $j$  ile birlikte bir  $P_u$  mukavemetine sahiptir. Eğer yapıda çatlak oluşmuşsa yapının mukavemeti  $P_u$ 'nun altına düşer. Bu kalıntı mukavemet genellikle  $P_{res}$  ile ifade edilir. Şekil 2.6'daki diyagram bir kalıntı mukavemet diyagramıdır. Kalıntı mukavemetin ( $P_{res}$ )  $P_u$ 'dan küçük olduğu göz önüne alınacak olursa ( $P_{res} < P_u$ ), buna bağlı olarak güvenlik faktörünün ( $j$ ) değeri de düşecektir. Yani  $j = P_{res}/P_s$  değeri,  $j = P_u/P_s$  değerine göre daha düşüktür. Bu durumda kırılma hasarının olma ihtimali daha yüksektir. Kırılma olayı sonucu yapı iki ya da daha çok parçaya ayrılır. Bu durumda sonuç bir felakete yol açabilir. Kırılma olayının gerçekleşmesi için  $P = P_{res}$  yük durumunun oluşması gerekir. Kırılma süreci yavaş ve kararlı bir şekilde devam edebilir ancak yapı hala tek parçadır. Nihayet kırık kararsız bir duruma geçer ve yapı iki veya daha çok parçalar halinde kırılır. Bütün bu kararlı ve kararsız kırılma süreçleri birkaç saniyede meydana gelebilir. Eğer

yük durumu  $P=P_{res}$  olmaz ve yük, devam eden servis yükünde ya da  $P_{res}$ 'in altında gerçekleşirse çatlak büyümeye devam edecektir. Bu süreç kırılma olarak tanımlanmaz ama yorulma, gerilme korozyonu ya da sürünme olaylarına bağlı olarak gerçekleşen çatlak mekanizmalarını içerir. Dolayısıyla çatlak sürekli uzamaya maruz kalır, kalıntı mukavemet düşer, güvenlik faktörü azalır ve buna bağlı olarak kırılma olasılığı gitgide artar. Eğer hiçbiri olmazsa ve yapı hala servisteyse kalıntı mukavemet sonunda  $P_s$ 'ye (ya da Şekil 2.7'de gösterilen ortalama servis yükü ( $P_a$ ) değerine) eşit olacaktır. O zaman emniyet faktörü 1'e düşecektir ve kırılma  $P_s$ 'nin altında hatta  $P_a$ 'da olacaktır. Bunu önlemek için çatlak, yapının servis yükleri sırasında kırılmasına sebep olacak bir büyüklüğe ulaşmadan engellenir. Bu yüzden yapı veya parçalar çatlak belli boyutlara gelmeden değiştirilmeli ya da tamir edilmelidir. Yukarıda bahsedilen limitlerin  $P_s$ 'nin bir miktar üzerinde olması gerekir. Örneğin, kalıntı mukavemetin asla  $P_p=gP_s$ , eşitliğinden daha düşük bir değerde olması istenmez. Bu eşitlikte  $g$ , kalıntı mukavemet güvenlik faktörü,  $P_p$  ise izin verilebilir minimum kalıntı mukavemettir. Başlangıçtaki  $j$  değerinin ne olması gerektiğine tasarım mühendisi veya kullanıcı karar vermemelidir. Bu faktör, mühendislik dernekleri (ASME) tarafından düzenli bir şekilde yayınlarla ilan edilir. Aynı şekilde bu kural  $g$  değeri içinde geçerlidir. Ayrıca bazı kurallar ya da amaçlar belirlenmeli, bazı kararlar verilmeli ve kalıntı mukavemet diyagramından tayin edilebilecek izin verilebilir maksimum çatlak boyunu ( $a_p$ ) bulmak için izin verilebilir minimum kalıntı mukavemet değeri belirlenmelidir. Kalıntı mukavemet diyagramından  $P_p$  değerine karşılık gelen maksimum izin verilebilir çatlak boyu bulunabilir. Hasar tolerans analizlerinde izin verilebilir en büyük çatlak boyuna karar verilir. İlk amaç, Şekil 2.6'daki kalıntı mukavemet diyagramının hesaplanmasıdır. Eğer  $a_p$ , direkt olarak  $P_p$  noktasına hesaplanabilirse kalıntı mukavemet diyagramının tamamına gerek olmayabilir. Fakat bunun için  $a_p$  ve  $P_p$  noktalarının olması gereklidir. Ancak bu nadir olarak uygulanan bir yöntemdir. Genelde diyagramın tamamının hesaplanması daha çok tercih edilir. İzin verilebilir maksimum çatlak boyu, daha önceden hesaplanmış kalıntı mukavemet diyagramındaki, minimum kalıntı mukavemet değerine karşılık gelir. Kalıntı mukavemet diyagramı, değişik çatlak bölgeleri ve bir yapının değişik parçaları için farklı olacaktır. Bununla birlikte izin

verilebilir çatlak boyları da farklı olacaktır. İzin verilebilir çatlak boyu bazen kritik çatlak boyu olarak ta adlandırılır.

Kırılma kontrolünün amacı kritik çatlakların önlenmesidir. Kritik bir çatlak, parçanın çalışması esnasında yapıda kırılmaya sebep olacaktır. Bu yöntemde çatlakların daha fazla ilerlemesine engel olunur. Çatlakların sadece izin verilebilir çatlak boyuna ( $a_p$ ) kadar ilerlemesine izin verilir. Kritik çatlak boyuna ancak yük  $P_p$  seviyesine kadar çıktığında ulaşılır. Hasar tolerans analizlerinin ikinci bir amacı, Şekil 2.8’de gösterilen çatlak ilerleme eğrisinin hesaplanmasıdır.

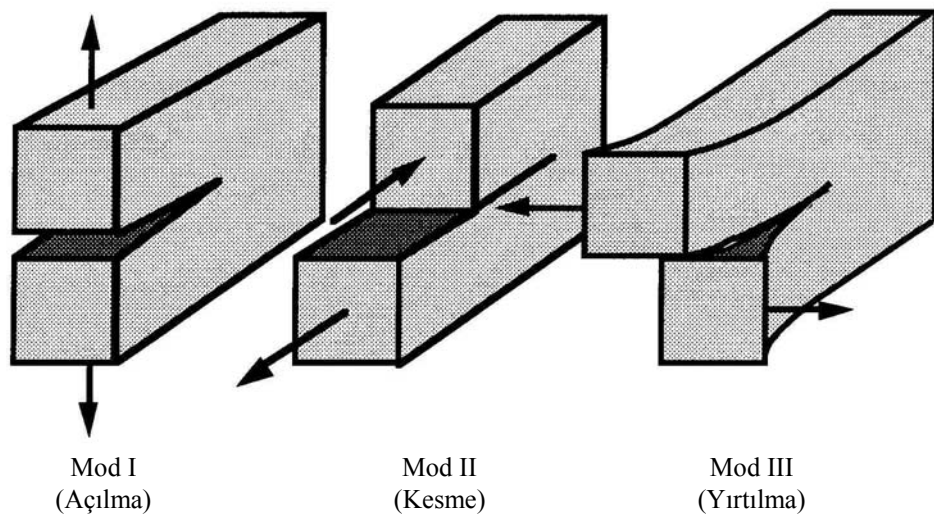


Şekil 2.8. Çatlak ilerleme eğrisi [8]

Normal servis yükleri altında çatlaklar yorulma, gerilme korozyonu ya da sürünmeden dolayı ilerlerler. Şekilde görüldüğü gibi eğri sürekli artan bir şekle sahiptir. Başlangıçta oluşan küçük boyuttaki bir çatlak ( $a_0$ ), zamanla ilerler. Şekil 2.6’den elde edilen izin verilebilir maksimum çatlak boyuna ( $a_p$ ) göre Şekil 2.8’deki eğri çizilebilir. Bu grafiğe göre güvenli çalışma zamanı ( $a_p$  değerine kadar) hesaplanabilir. Eğer bir parçada  $a_0$  büyüklüğünde bir başlangıç hatası olduğu düşünülürse bu durumda parça ya da yapı bir  $H$  zamanından sonra

değiştirilmelidir. Alternatif olarak  $a_0$ , yapılan kontrollerle çatlak tespitinde bir sınır olabilir. Bu çatlak ( $a_0$ ), bir  $H$  zamanı sonunda  $a_p$  değerine kadar ilerleyecektir. Çatlak ilerlemesinin  $a_p$  değerine ulaşması istenmediğinden çatlak kontrollerle belirlenmeli, daha sonra  $H$  zamanından önce tamir edilmeli ya da parça değiştirilmelidir. Bu yüzden kontroller arasındaki periyot  $H$  süresinden daha az olmalıdır. Grafikte görüldüğü gibi  $t_1$  noktasında yapılan bir kontrolde çatlak gözden kaçabilir. Çünkü  $a_0$ , belirlenebilme (algılanabilme) limitindedir. Eğer bir sonraki kontrol  $H$  süresinden sonra yapılırsa çatlak zaten  $a_p$  değerine ulaşmış olacaktır. Buda kötü sonuçlara neden olabilir. Bu yüzden kontrol aralığı  $H$  zamanından daha düşük olmalıdır. Genelde bu kontroller  $H/2$  zaman aralığında yapılır. Her durumda güvenli çalışma süresi  $H'$ 'den bulunur. Buna karşılık  $H$ , hasar tolerans analizleri sonucu ortaya çıkar [8].

Kırılma, gerilme altındaki katının iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Genel olarak metallerin kırılması sünek, klivaj (gevrek) ve taneler arası kırılma şeklinde olabilir [7]. Bu mekanizmalara geçmeden önce metallerde gerçekleşen kırılma modlarından bahsetmek gerekir. Servis esnasında yük ve parça geometrisinden dolayı üç farklı çatlak modu oluşur. Bunlar Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Bu modlar, açılma (çekme) modu, kesme modu ve yırtılma modu olarak adlandırılırlar. Şekildeki gölgeli alanlar çatlak yüzeylerini temsil eder [16].



Şekil 2.9. Çatlak açılma modları [17]

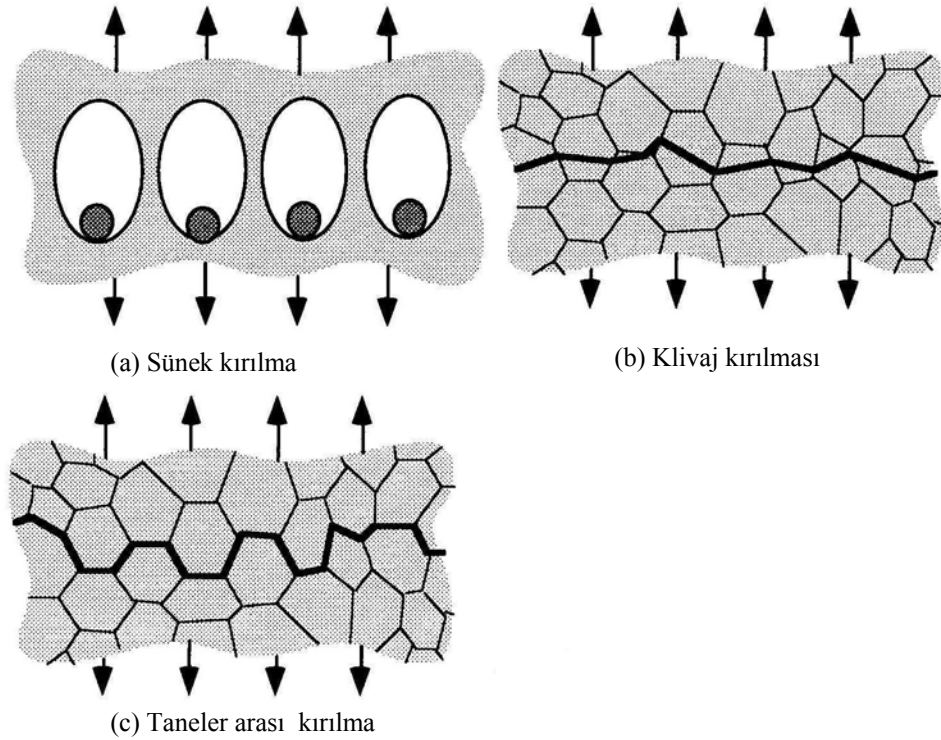


I. tip yüklemde (açılma modu) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzlemine diktir.

II. tip yüklemde (kesme modu) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzlemindedir.

III. tip yüklemde (yırtılma modu) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi yine çatlak düzleminde, fakat yer değiştirme yönü kesme yüklemesinin sebep olduğu yönden farklıdır. Uygulamalarda çatlakların büyük çoğunluğu I. tip yüklemde kaynaklanmaktadır [13].

Şekil 2.10, metallerde ve alaşımlarda görülen en genel üç kırılma mekanizmasını şematik olarak göstermektedir.

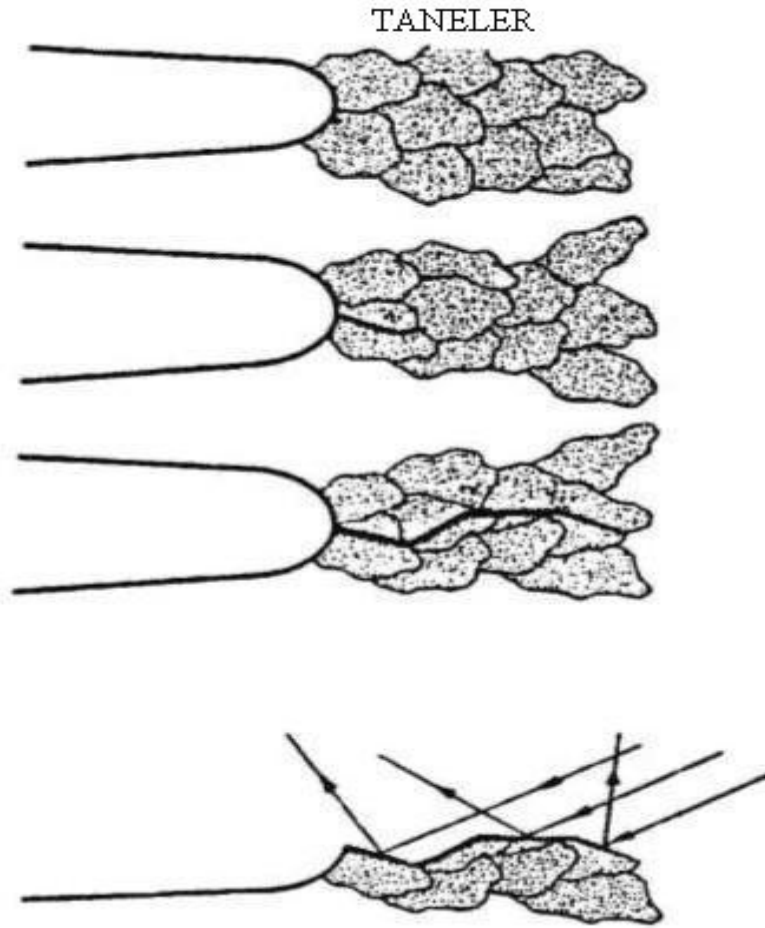


Şekil 2.10. Metallerde oluşan kırılmanın üç ayrı mikro mekanizması [17]

Şekil 2.10 a'da gösterilen sünek malzemeler genellikle, ikinci faz partikülleri ve kalıntılarda başlayan mikroskobik boşlukların birleşmesi ve ilerlemesi sonucu hasara uğrarlar. Şekil 2.10 b'de gösterilen klivaj kırılması, özel

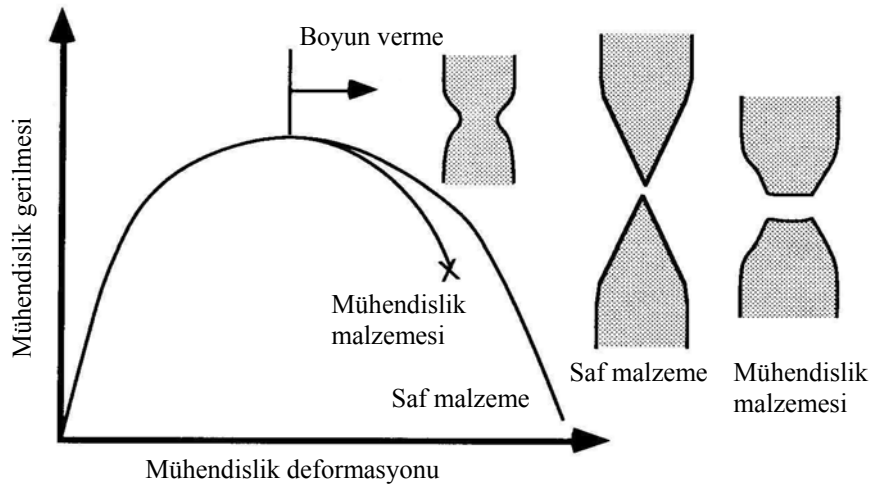
kristalografik düzlemler boyunca bir ayrılmanın olduğu kırılma çeşididir. Bu kırılma olayında çatlak taneleri kesecek şekilde ilerler. Şekil 2.10 c’de gösterilen taneler arası kırılmada ise çatlak tane sınırları boyunca ilerler [17].

Klivaj kırılma, atomik düzlemlerin birbirinden ayrılmasıdır. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi taneden taneye tercihli ayrılma düzlemi değişik bir yönlenebilir ve bu çok yüzeyli bir kırılmaya sebep olur. Yüzeyler düzdür ve bundan dolayı ışığı iyi yansıtırlar. Bu klivaj kırığının kırılmadan hemen sonra parlak olmasına sebebiyet verir. Fakat oksidasyon sebebiyle kısa sürede bu parlaklık kaybolur [8].



**Şekil 2.11.** Keskin olmayan bir çatlak ucunda klivaj kırılmasının oluşumu. En alttaki şekilde kırık yüzeyin parlaklığı ve ışığı yansıtması resmedilmiştir [8]

Metallerin sünek kırılmaları, büyük miktardaki şekil değişiminden sonra meydana gelir [7]. Şekil 2.12, sünek bir metalde tek eksenli çekme davranışını göstermektedir. Malzeme kararsız bir noktaya ulaşır ve maksimum yükün üzerinde malzemede boyun verme anlamına gelen çapraz şekle sahip bir şekil değişimi olur. Yüksek saflıktaki malzemelerde çekme numunesinde boyun verme, malzemenin alanındaki yaklaşık %100'lük bir azalma ve oldukça yüksek bölgesel plastik deformasyonlarda keskin bir nokta şeklinde olur [17].



Şekil 2.12. Sünek malzemelerin tek eksenli çekme deformasyonu [17]

Her yapısal malzeme, parçacıklar ve kalıntılar içerir. Genellikle bu parçacıklar alaşım elementlerinin karmaşık bileşikleridir. Bazı alaşım elementleri dökülebilirlik ve işlenebilirliği artırmak için kullanılır; diğerleri alaşımın mukavemetini artırmak için eklenir [8]. Mikro boşluklar, ikinci faz partikülleri ve kalıntılarda başlar; boşluklar, kırılmaya sebep olan bir makroskobik süreksizlik oluşturacak şekilde ilerlerler.

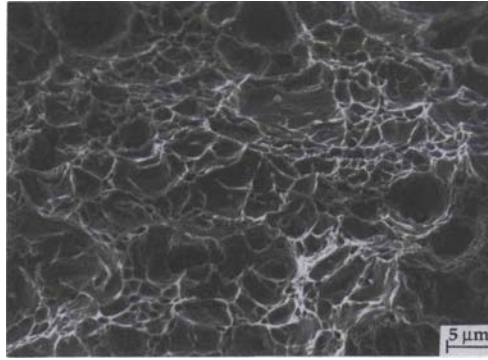
Sünek kırılmayla ilgili genel olarak gözlemlenmiş aşamalar aşağıda belirtilmiştir:

- Kalıntılarda veya ikinci faz partiküllerinde, yüzeyler arası bağların kopması veya partikül kırılması ile serbest bir yüzeyin oluşması
- Hidrostatik gerilme ve plastik deformasyon etkisiyle boşluğun, partikül etrafında ilerlemesi

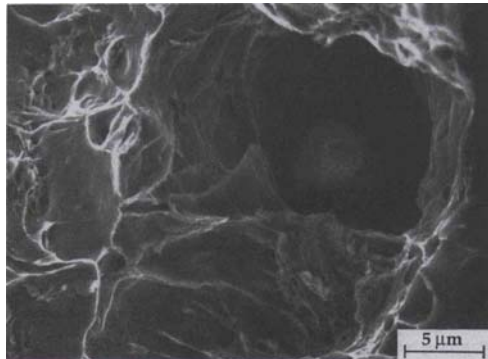
- Yakın boşlukların birbirleriyle birleşerek ilerlemesi

Kalıntılar ve ikinci faz partiküllerinden oluşmuş matris malzemelerde boşluk oluşumu kritik bir adımı oluşturur; kırılma, boşluk oluşumundan hemen sonra gerçekleşir. Boşluk oluşumu küçük oranda olursa kırılma özellikleri, boşlukların ilerleme ve birleşme mekanizmalarına göre kontrol edilebilir; boşlukların kritik bir boyuta ulaşması, boşluklar arasında bir plastik kararsızlık bölgesinin oluşmasına neden olur. Bu da sonuçta hasara neden olur.

Boşluklar oluştuğunda, daha fazla plastik deformasyon ve hidrostatik gerilme, boşlukların ilerlemesine ve ani olarak birleşmesine sebep olur. Şekil 2.13 ve 2.14'te, gamzeli kırılma yüzeylerinde tipik bir mikro boşluk birleşmesinin, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntüsü verilmektedir. Şekil 2.14, boşluk oluşmuş bir kalıntıyı göstermektedir.

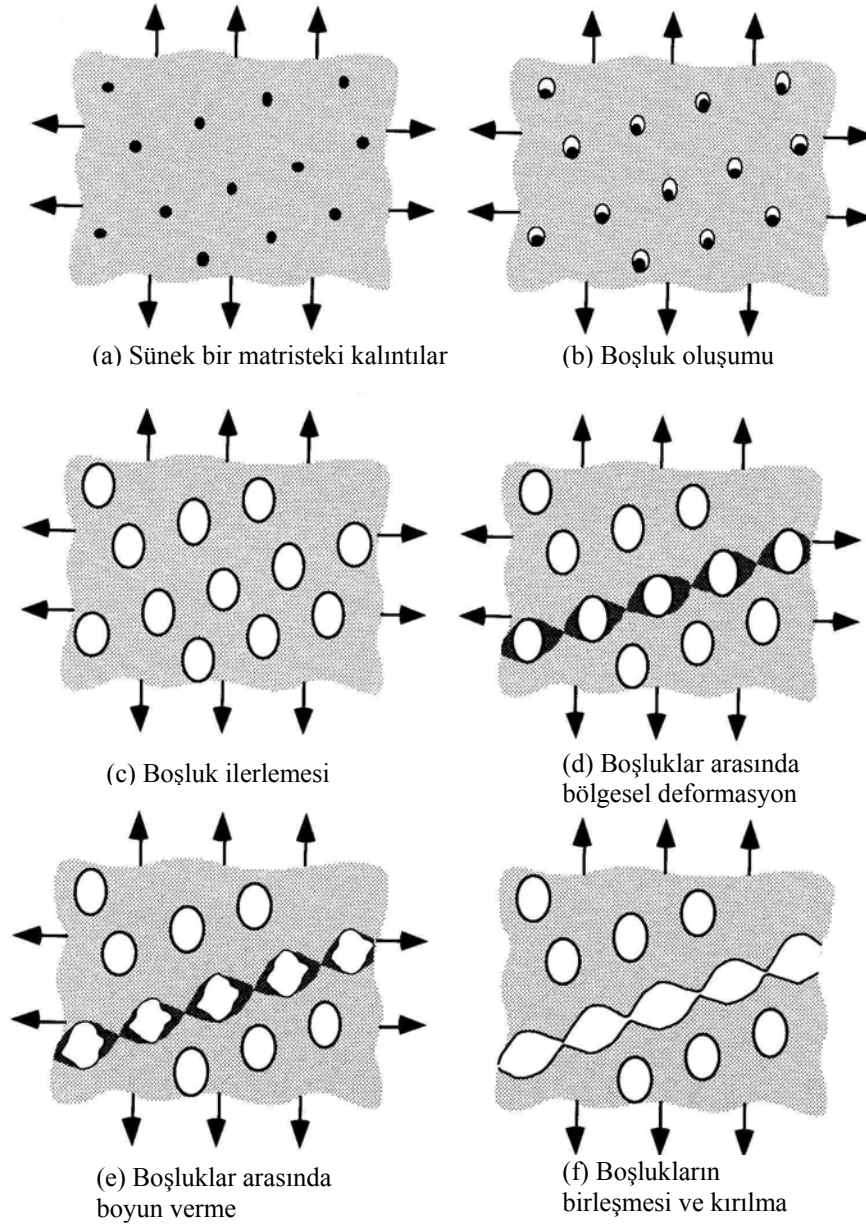


**Şekil 2.13.** Düşük karbonlu bir çelikte taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilmiş sünek kırılmanın görüntüsü [17]



**Şekil 2.14.** Sünek kırılmanın gerçekleştiği çelik malzemede oluşmuş bir küresel kalıntının yüksek büyütme fraktografisi [17]

Şekil 2.15, mikro boşlukların ilerlemesi ve birleşmesini göstermektedir.

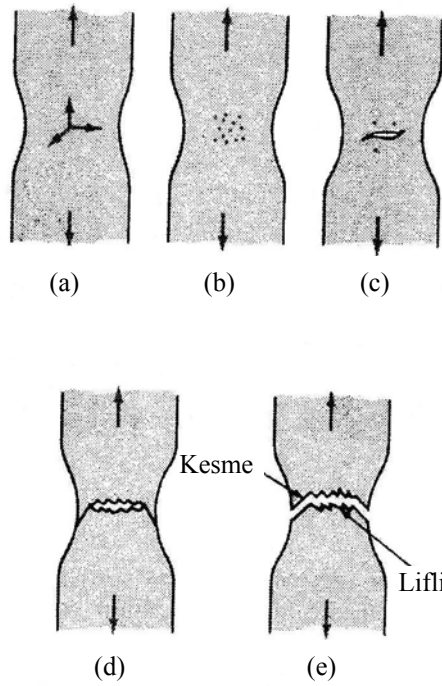


Şekil 2.15. Sünek metalde boşluk oluşumu, ilerlemesi ve birleşmesi [17]

Boşlukların büyük olduğu durumlarda diğer komşu boşluklarla etkileşimler başlar. Boşlukların etrafındaki düzlem boyunca plastik deformasyon yığılması olur ve boşluklar boyun verme şeklinde birbirleriyle birleşme eğilimi

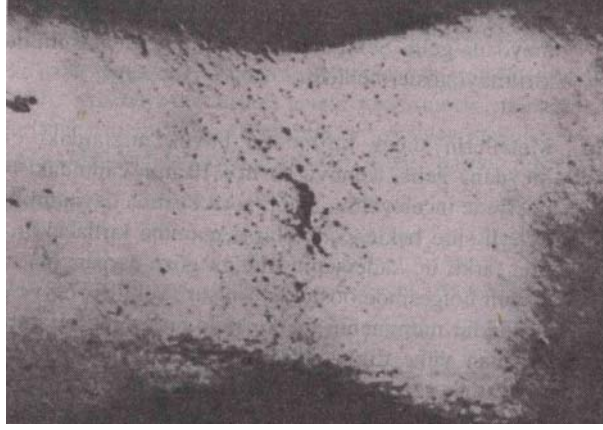
gösterirler. Son olarak boşluklar birbirleriyle birleşerek yapının kırılmasına sebep olurlar. Kırılmanın yönü gerilme durumuna bağlıdır [17].

Sünek kırılmada birbirinden farklı üç kademenin olduğu göze çarpar: (1) numunede bir boyun ve bu boyun bölgesinde boşluklar oluşur (Şekil 2.16 a ve b); (2) boyun bölgesindeki boşluklar numunenin merkezinde birleşerek bir çatlak oluşturur ve çatlak uygulanan yüke dik yönde, numunenin yüzeyine doğru ilerler (Şekil 2.16 c); (3) çatlak yüzeye yaklaştığında çatlağın yönü çekme eksenine göre  $45^\circ$  değişerek çanak ve koni kırılması meydana gelir (Şekil 2.16 d ve e).



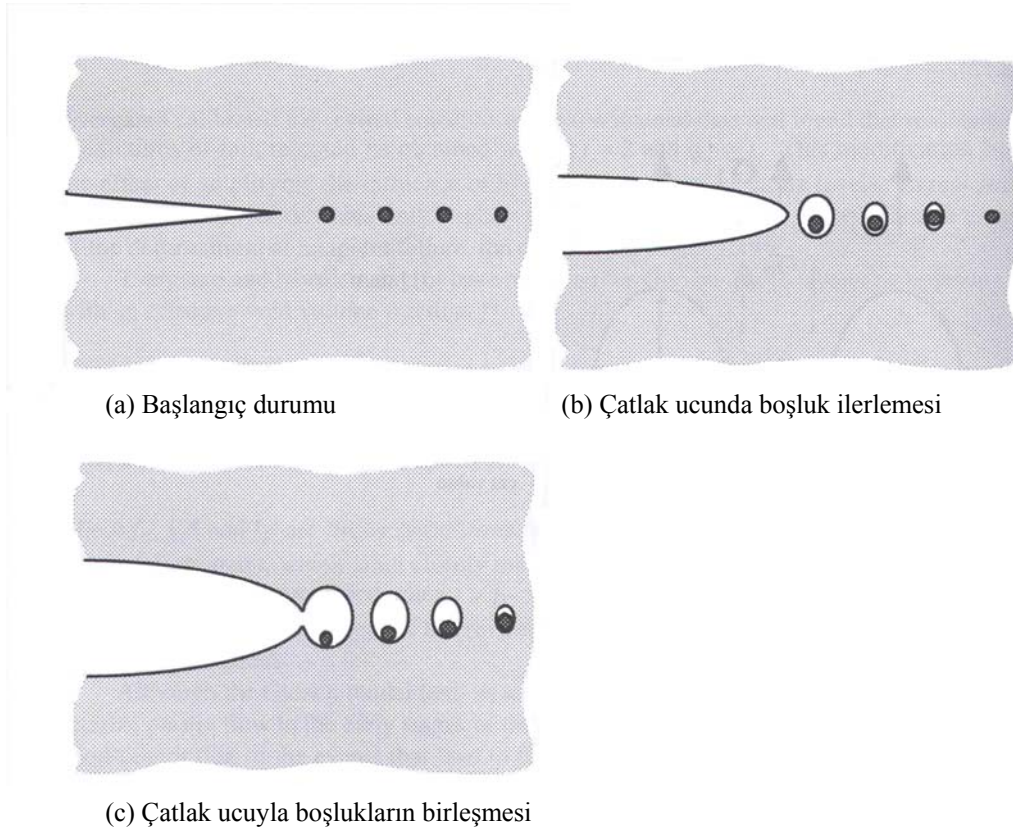
Şekil 2.16. Çanak ve koni kırılmanın oluşum aşamaları [7]

Şekil 2.17, biçim değiştiren yüksek saflıktaki bakır numunenin boyun bölgesindeki iç çatlakları göstermektedir [7].



**Şekil 2.17.** Yüksek saflıktaki çok kristalli bir bakır numunede boyun bölgesindeki iç çatlama [ 7]

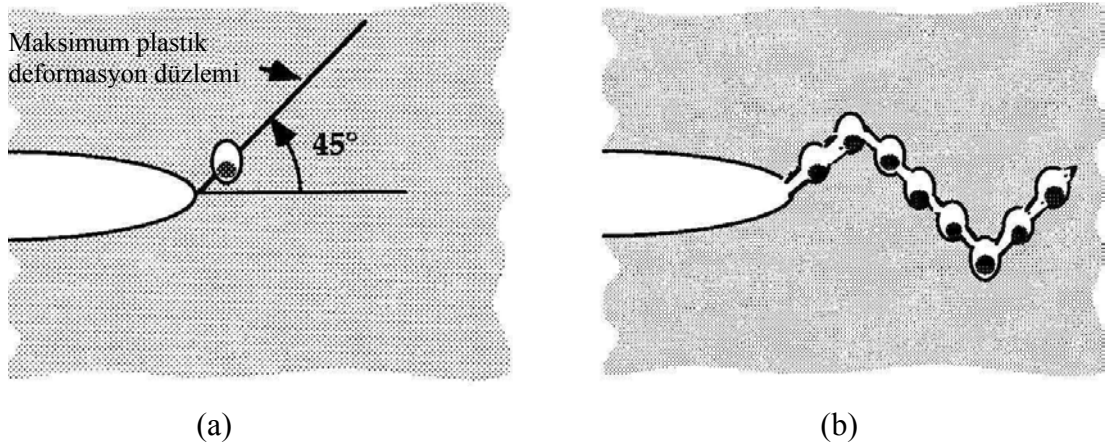
Şekil 2.18, daha önceden varolan bir çatlak ucunda mikro boşluk başlangıcı, ilerlemesi ve birleşmesini göstermektedir.



**Şekil 2.18.** Sünek çatlak ilerleme mekanizması [17]

Yük uygulanan çatlaklı numunede, çatlak ucundaki bölgesel gerilmeler ve deformasyonlar, boşlukların oluşumu için yeterli olurlar. Yuvarlak bir şekle sahip olan bu boşluklar bir süre sonra çatlakla birleşir. Devam eden bu süreçte çatlak ilerler. Sünek çatlak ilerlemesi genellikle kararlıdır. Çünkü çatlak ilerlemesinin başlangıç aşamasında artan bir direnç eğrisi gözlenir.

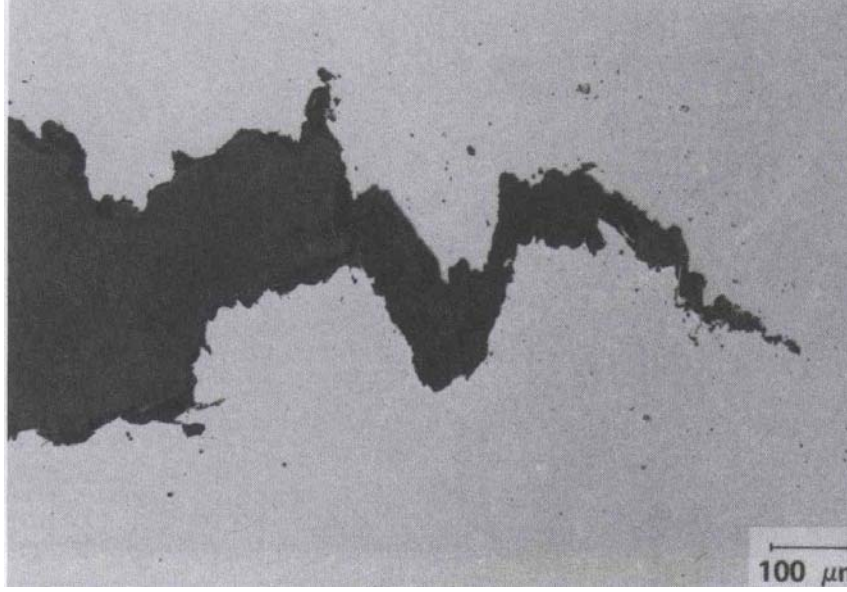
Bir levhanın merkezindeki düzlem deformasyon çatlak ilerlemesi, nispeten düzdür ama daha ayrıntılı bir inceleme daha karmaşık bir yapı olduğunu ortaya çıkarır. Şekil 2.19 a'da gösterildiği gibi Mod I durumundaki bir yüklemde maksimum plastik deformasyon, çatlak düzlemine göre  $45^\circ$ 'de oluşur. Bu açı boşlukların birleşmesi için tercih edilen bir açıdır. Şekil 2.19 b'de boşlukların zikzak şeklinde birleşmesi resmedilmiştir.



Şekil 2.19.  $45^\circ$ 'lik zikzak şeklindeki sünek çatlak ilerlemesi [17]

Zikzak şeklindeki çatlak çıplak gözle ya da küçük büyütmede bakıldığı zaman düz bir çizgi halindedir ama yüksek büyütmede bakıldığı zaman, çatlağın ilerleme doğrultusuyla  $\pm 45^\circ$ 'lik bir açı yaptığı görülür. Bu zikzak şekil, sünek malzemelerde sık sık gözlemlenir. Şekil 2.20, bu davranışı gösteren bir çatlağın ilerlemesinin metalografisini göstermektedir [17].





**Şekil 2.20.** Yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı bir A710 çeliğinde, sünek çatlak ilerlemesinin optik mikrografisi [17]

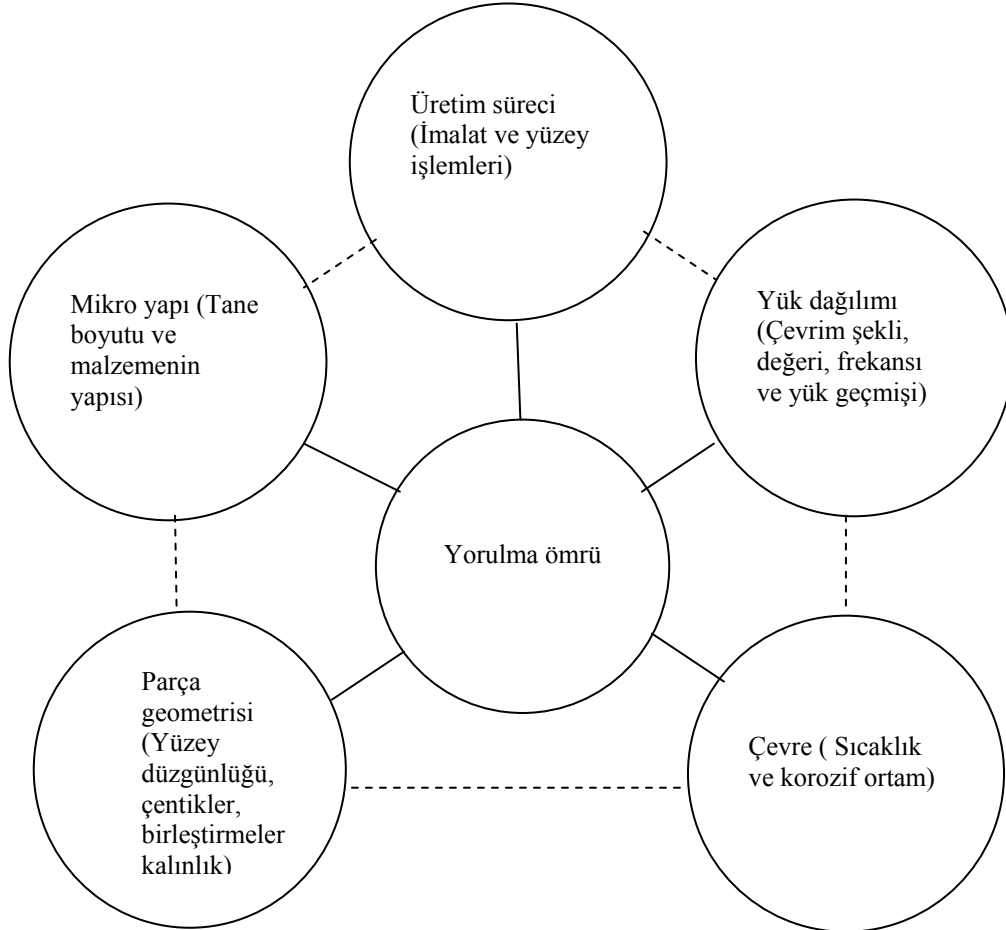
Üçüncü bir kırılma tipi taneler arası kırılmadır. Buradaki ayırım (tane sınırları boyunca) kırılma yoluna göre yapılır. Ancak taneler arası kırılma tamamen farklı bir kırılma tipi değildir. Ayrılma mekanizması, ister taneler arası ister taneleri kesen biçimde ve ister klivaj kırılmasına ister sünek kopmaya benzesin, tane sınırındaki klivaj kırılması, taneleri kesen klivaj kırılması gibi iyi tanımlanamaz [8].

### 2.3. Malzemede Yorulma Olayına Etki Eden Faktörler

Yorulma ömrünü etkileyen faktörler genel olarak aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir.

- Malzemenin mikro yapısı: Tane boyutu ve malzemenin yapısı,
- Üretim süreci: İmalat ve yüzey işlemleri,
- Çevre: Sıcaklık ve korozyon ortamı,
- Yük dağılımı: Çevrim şekli, değeri, frekansı ve yük geçmişi,
- Parça geometrisi: Yüzey düzgünlüğü, çentikler, kaynaklama, birleştirmeler ve parça kalınlığı.

Şekil 2.21, yukarıdaki faktörlerin yorulma ömrüyle olan ilişkisini göstermektedir. Öncelikli olarak şu belirtilmelidir ki; bu faktörlerin etkisi malzemeye göre farklılık göstermektedir [12].

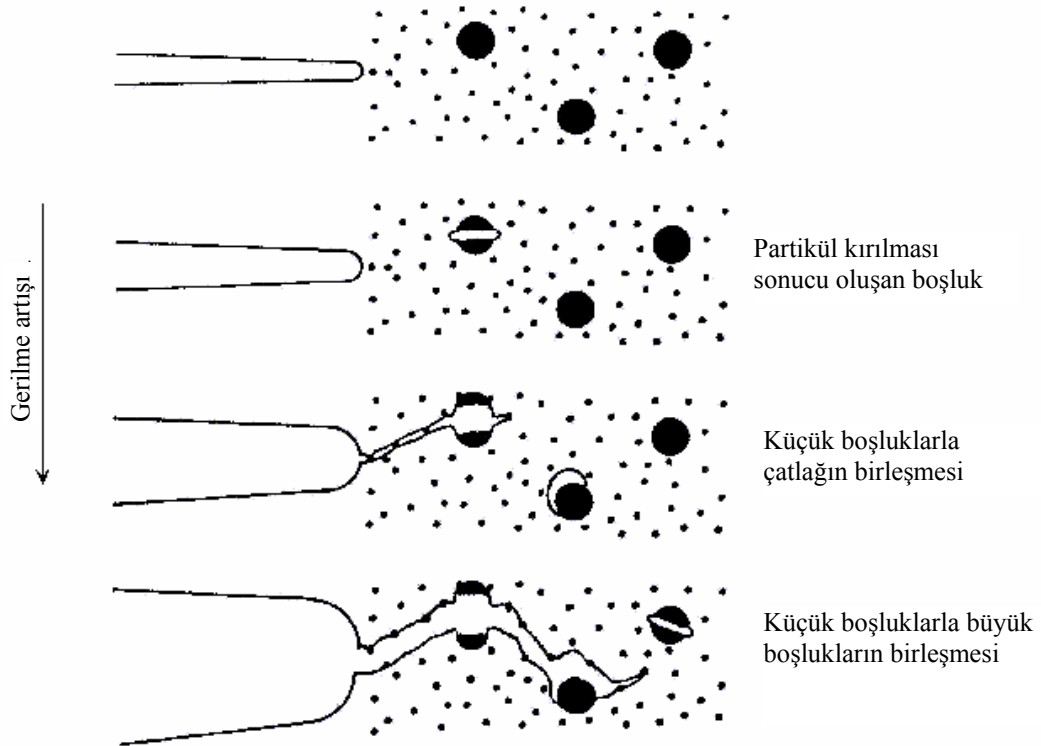


Şekil 2.21. Bir yapının yorulma ömrünü etkileyen faktörler [18]

### 2.3.1. Mikro yapının etkisi

Tane yapısı, ortalama tane boyutu ve mikro yapı hataları yorulma ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Örneğin normal çevre şartlarında büyük taneli bir malzemenin yorulma sınırı, küçük taneli bir malzemeyle karşılaştırıldığında zaman daha düşüktür. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda (metallerin sürünme aralığında), büyük taneli malzemelerin yorulma özellikleri daha iyidir [12]. Maruz kalınan gerilmelerin büyük seviyelerde olduğu kısa ömürlü yorulma koşulları

altında, çoğu metalin yorulma ömrü tane boyutundan bağımsızdır. Buna karşın, gerilmelerin daha düşük seviyelerde olduğu uzun ömürlü yorulma koşulları altında, tane boyutu küçüldükçe, çoğu metalin yorulma ömrü artmaktadır [10]. Metalik bir malzemede yorulma hasarı, genellikle dislokasyon hareketlerinin sebep olduğu kalıcı plastik deformasyona sebep olur. Dislokasyon hareketleri çökelti, kalıntı ve tane sınırları gibi unsurlardan etkilenir [12]. Hata olarak tanımlanan malzeme içerisindeki kalıntılar, parçacıklar ve boşluklar gerilme yığılmalarına sebep olurlar ve yapının mukavemetini dolayısıyla da yorulma ömrünü azaltırlar [10]. Genellikle bu parçacıklar alaşım elementlerinin karmaşık bileşikleridir. Bazı alaşım elementleri dökülebilirlik ve işlenebilirliği artırmak için kullanılır. Diğerleri ise alaşımın mukavemetini artırmak için eklenir. Alaşımlandırma sonucu oluşan bu kalıntı parçacıklar malzeme yapısına göre daha sert ve kırılındırlar. Şekil 2.22’de gösterildiği gibi yüklemenin etkisiyle kalıntı içerisinde veya çevresinde mikro boşluklar oluşur. Zamanla bu boşluklar birleşerek kırılma olayı gerçekleşir [8].



Şekil 2.22. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi [14]

### 2.3.2. Üretim sürecinin (imalat ve yüzey işlemleri) etkisi

Yorulma olayında çatlaklar genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte ya da ani kesit değişimlerinin olduğu yerden başlar. Yüzeyde başlayan çatlağın kendisi, daha sonra çentik etkisi göstererek gerilme yığılmasının oluşmasına ve çatlağın daha hızlı ilerlemesine yol açar. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını arttırmak, büyük ölçüde yüzeyde çatlak oluşumunun önlenmesiyle olur. Çatlak oluşumunun engellenmesi yüzey özelliklerinin artırılması ile mümkündür.

Özellikle sert malzemelerde yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımını oldukça artırmaktadır. Örneğin yüzeyi parlatılmış bir numunenin yorulma dayanımı sınırı, tornada kabaca işlenmiş bir numuneye oranla % 15–40 daha yüksektir. Yüzeydeki pürüzlülükler birer çentik etkisi yaparak, gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak oluşumuna neden olmaktadır.

Yorulma olayı yüzeyle ilgili olduğundan yüzey özelliklerinin ve yüzey düzgünlüğünün değişmesine sebep olacak bir işlem, malzemenin yorulma özelliklerini de değiştirecektir. Yüzey düzgünlüğün ve yüzey sertliğinin artırılması ile malzemenin çatlak oluşmasına karşı direncini arttırılacağından yorulma dayanımı arttırılmış olur. Çelik malzemelerde iç yapı değişmeden uygulanan sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemleri yorulma dayanımı açısından oldukça fayda sağlamaktadır [6].

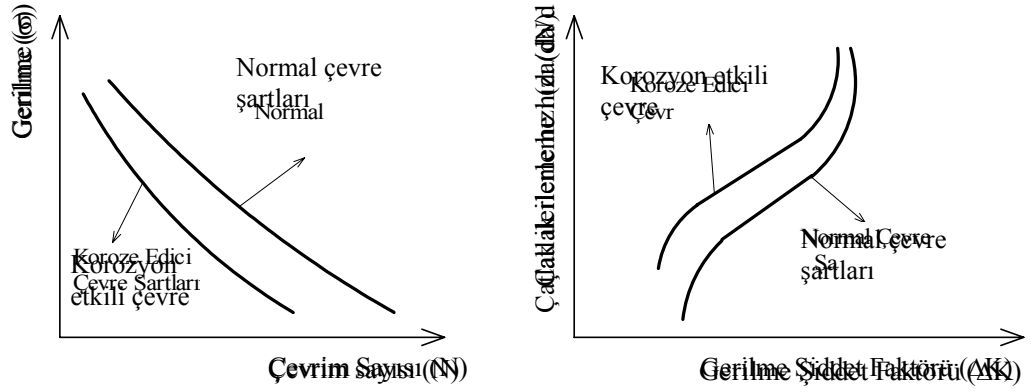
Dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi üretim teknikleri tane yönlenmesinden dolayı malzemelerde yöne bağlı mekanik özellikler oluştururlar. Yorulma dayanımı yönlendirilmiş kısımlarda, diğer yöne göre daha yüksektir. Malzeme işlenmesi aynı zamanda çukur ve boşluk gibi mikroskobik kusurların oluşmasına neden olabilir. Bu kusurlar o bölgelerdeki gerilmeleri artırırlar ve çatlak başlangıcı için potansiyel bölgeleri oluştururlar. Isıl işlemler, soğuk ve sıcak işlemler, yüzey kaplaması gibi işlemler yorulma ömrünü etkiler. Örneğin imalat sırasında parça yüzeyinde kalıntı gerilmeler oluşabilir [12]. Kalıntı gerilmeler dışarıdan malzemeye herhangi bir yük uygulanmaksızın malzemede oluşan denge gerilmeleridir. Çekiçleme, soğuk haddeleme ve statik ön yük uygulanması gibi işlemler yüzeyde basma kalıntı gerilmeleri oluşturmak için

kullanılan işlemlerdir. Malzeme yüzeyinde oluşturulan basma kalıntı gerilmeleri yorulma ömrünü artırırken, çekme yönündeki kalıntı gerilmeleri yorulma ömrünü azaltmaktadır [15].

### 2.3.3. Çevresel faktörler

Önemli bir çevresel faktör olan korozyon, çevrenin elektro-kimyasal etkisi ile oluşan malzeme tahribi ve malzeme kaybı olarak tanımlanabilir [2]. Yorulma olayından önce malzemenin korozyona uğraması, malzemenin yüzeyinde pürüzler ve boşluklar oluşmasına ve böylelikle malzemenin direncinin azalmasına sebep olur. Korozyonun sebep olduğu bu boşluklar çentik etkisi yaparak gerilmelerin birikmesine ve yorulma dayanımının düşmesine neden olurlar. Korozyon olayının kimyasal etkisi ile yorulma olayının mekanik etkisinin aynı anda oluşmasına korozyon yorulması denir [6]. Korozyon yorulması olayının etkisi korozyon olayının ve yorulma olayının ayrı ayrı etkisinden daha fazladır. Korozif çevre koşullarının etkisi ile çatlakların başlangıç ve ilerleme aşamaları daha hızlı olur. Korozyon yorulmasında ilk olarak malzemenin yüzey kısımlarında bozulmalar görülür. Yüzey kalitesinin bozulması sonucunda yüzeyde gerilme yığılmaları meydana gelir. Daha sonra yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Bu nedenle yorulma hasarının hem çatlak başlangıç hem de çatlak ilerleme aşamaları, oluşan korozyon olayının etkisiyle hızlanır. Yorulma çatlağı başlangıç aşaması süresince, korozyon yorulmasının temel mekanizması, metal yüzeyini korozif çevrenin bozması ve parça yüzeyinde oksit film tabakasının oluşmasıdır. Oluşan bu oksit tabakası genellikle bir koruyucu tabaka gibi davranarak metalin daha fazla korozyona uğramasını önler. Fakat maruz kalınan çevrimsel yükler bu tabakada bölgesel çatlaklar oluşturur ve metalin tekrar çevre ile temasını sağlar [15]. Korozif çevre koşullarının malzemelerin yorulma ömürleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Korozif çevre koşulları altında yorulma olayının meydana gelmesi için gereken gerilme değerleri, normal koşullardakine göre daha düşük değerlerdedir. Bu etki malzeme-çevre karakteristiklerine bağlı olarak değişir. Korozif çevresel etkiler, çatlak ilerleme hızını ve çatlağın başlama, oluşma

olasılığını etkiler [12]. Şekil 2.23'te korozif çevre koşullarının gerilme-ömür ve çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü grafiklerine etkisi görülmektedir [19].



**Şekil 2.23.** Korozyonun etkili olduğu çevrenin  $\sigma$ -N diyagramına ve çatlak ilerleme hızına etkisi [19]

Çevrimsel yüklerle maruz mühendislik parçaları servis süresince korozif çevrede çalıştıklarında malzeme yüzeyinde çatlak oluşumunu kolaylaştıran merkezler vardır. Bu merkezler;

- Yüzeyde oluşan kayma basamakları veya çıkıntılar
- Koruyucu oksit tabakasının kırıldığı yerler
- Yüzeye yakın kalıntılar [8].

Yorulma olayında ortam sıcaklığının da etkisi vardır. Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Ancak sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik hassasiyetini arttırmaktadır. Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde genellikle sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımı düşmektedir.

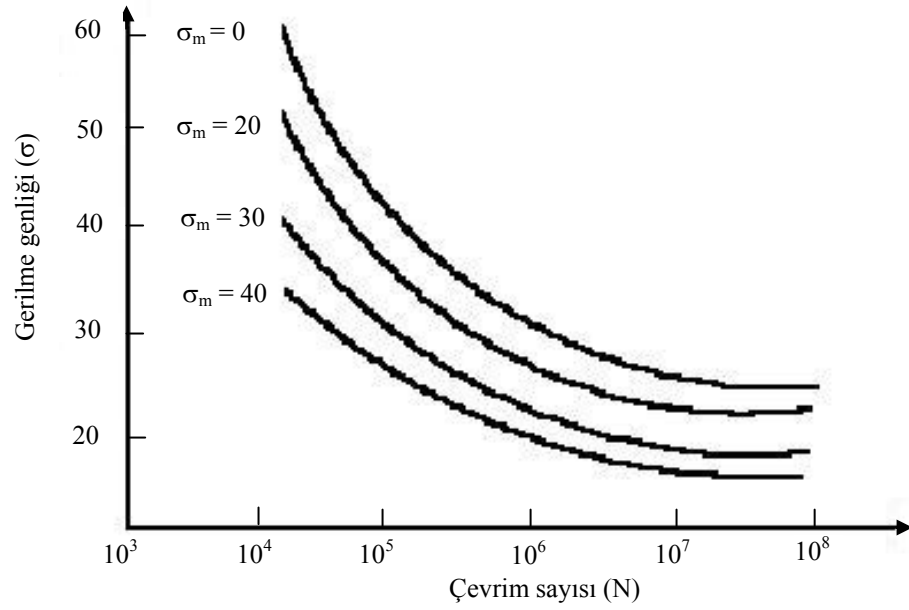
Deney sıcaklığı belirli değere ulaştığında sürünme olayı daha etkili olur. Kopma, yorulmadan çok sürünme sonucunda gerçekleşir. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulmada kırılma tane içinde, sürünmede ise tane sınırında olmaktadır. Şayet bir defalık ani sıcaklık değişimi malzemenin çatlmasına yol açmışsa bu olaya Isıl (Termal) Şok adı verilir. Çatlama çok sayıda tekrarlanan ısıl gerilmeler sonucunda olmuşsa bu olaya Isıl (Termal) Yorulma adı verilir

Korozyon, yorulma deneyinde uygulanan frekansın etkisini de değiştirmektedir. Normal deneylerde 10000 çevrim/dakikanın altındaki frekanslarda, deney sonuçları frekanstan etkilenmemektedir. Koroziif ortamlarda, frekansın etkisini azaltmak için mümkün olduğu kadar yüksek hızlarda çalışılmalıdır. Küçük hızlarda, deney zamanı uzayacağından korozyon daha etkili olacak ve frekansın etkisini dolaylı olarak etkileyecektir [6].

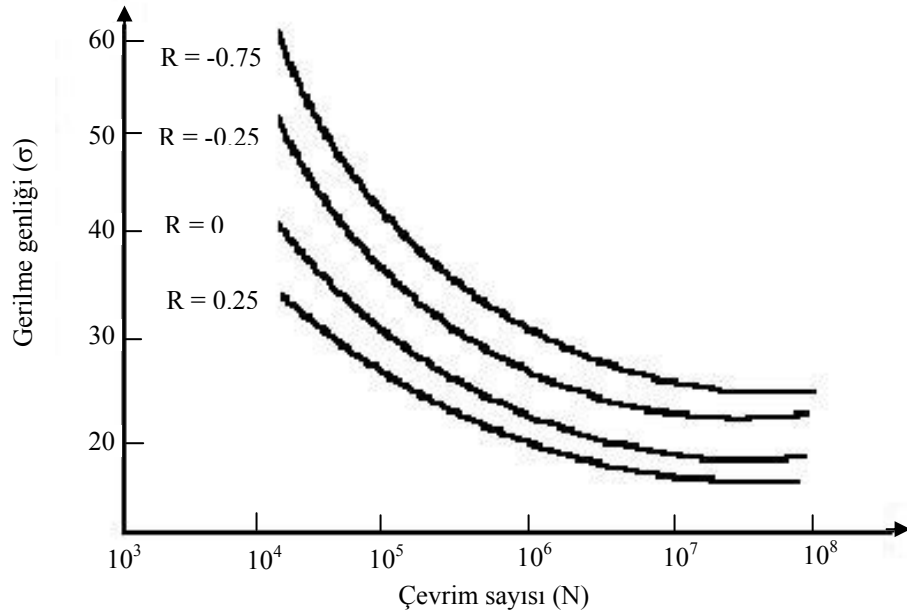
#### **2.3.4. Yük dağılımının etkisi**

Yorulma ömrü, yüklemenin şekli, büyüklüğü, ve hızından etkilenir. Gerçek çalışma şartlarında parçanın maruz kaldığı gerilmeler sabit genlikli değildir. Malzemeye zaman zaman diğer gerilmelere göre daha büyük gerilmeler uygulanabilir. Parçaya etkiyen aşırı gerilmeler yorulma ömrünü farklı şekillerde etkilemektedir [12].

Aynı tür gerilme için ortalama gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranının etkileri çok önemlidir. Şekil 2.24'te ortalama gerilmenin, Şekil 2.25'te ise gerilme oranının yorulma olayına etkileri görülmektedir. Şekil 2.24'te görüldüğü gibi ortalama gerilme arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısına dayanabileceği gerilme genliği (gerilme aralığı) azalmaktadır. Gerilme genliğinin büyük olduğu durumlarda, malzemenin büyük çevrim sayılarına dayanabilmesi için ortalama gerilmenin sifira yaklaşması gerekir. Yine Şekil 2.24'te görüldüğü gibi gerilme genliği küçüldükçe malzemenin yorulma dayanımı sınırı yükselmektedir. Şekil 2.25'te ise gerilme oranı arttıkça malzemenin belirli bir çevrim sayısına dayanabileceği gerilme genliği azalmaktadır.



Şekil 2.24. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği [6]



Şekil 2.25. Farklı gerilme oranları için gerilme genliği-ömür grafiği [6]

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak saptanamamıştır. Deney cihazlarının çoğunda uygulanan 200-10000 çevrim/dakikalık frekansın deney sonuçlarını pek etkilemediği kabul edilmektedir. Fakat çok düşük deney hızlarında çevrenin etkisinin daha fazla olması nedeniyle yorulma dayanımı sınırının azaldığı kabul edilmektedir. Diğer yandan çok yüksek frekanslarda,



malzemede oluşan ısılarda kısa zamanda yayınamaması, yorulma deneyi sonuçlarını olumsuz yönde etkilemektedir [6].

### 2.3.5. Parça geometrisi

Parça kesitinde delik, çentik ve ani kesit değişimlerinin bulunması yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Parça kesitinde görülen bu tür süreksizlikler gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak başlangıcına neden olurlar. Bu tür süreksizliklerin etkisi çentik etkisi şeklinde adlandırılır [6]. Sürekliliğin bozulduğu bu bölgelerde gerilme ve deformasyon, uygulanan gerilme ve deformasyondan daha büyüktür. Parçanın yüzey pürüzlülüğü, yüzey parlatma işlemleri ile giderilebilir. Ancak fonksiyonel özelliklerinden veya birleştirme gerekliliklerinden dolayı endüstriyel parçalarda çentikler kaçınılmazdır [12].

Makine parçalarındaki ani kesit daralmaları, yağ deliği, yolluk, vida dişi ve benzeri kısımlar daima çentik etkisi gösterirler. Bu parçaların dizaynında çentik etkisini minimuma indirecek uygun şekil ve boyutlar ile uygun imalat yöntemleri seçilmelidir.

Mühendislik uygulamalarında, yorulma dayanımının saptanması için daha gerçekçi bir yaklaşım, gerilme konsantrasyonlarının etkisini göz önünde bulundurmaya yapılır [6]. Gerilme konsantrasyon faktörü  $K_t$ , geometrik süreksizlikten dolayı oluşan maksimum gerilmenin nominal gerilmeye oranı şeklinde tanımlanmaktadır.

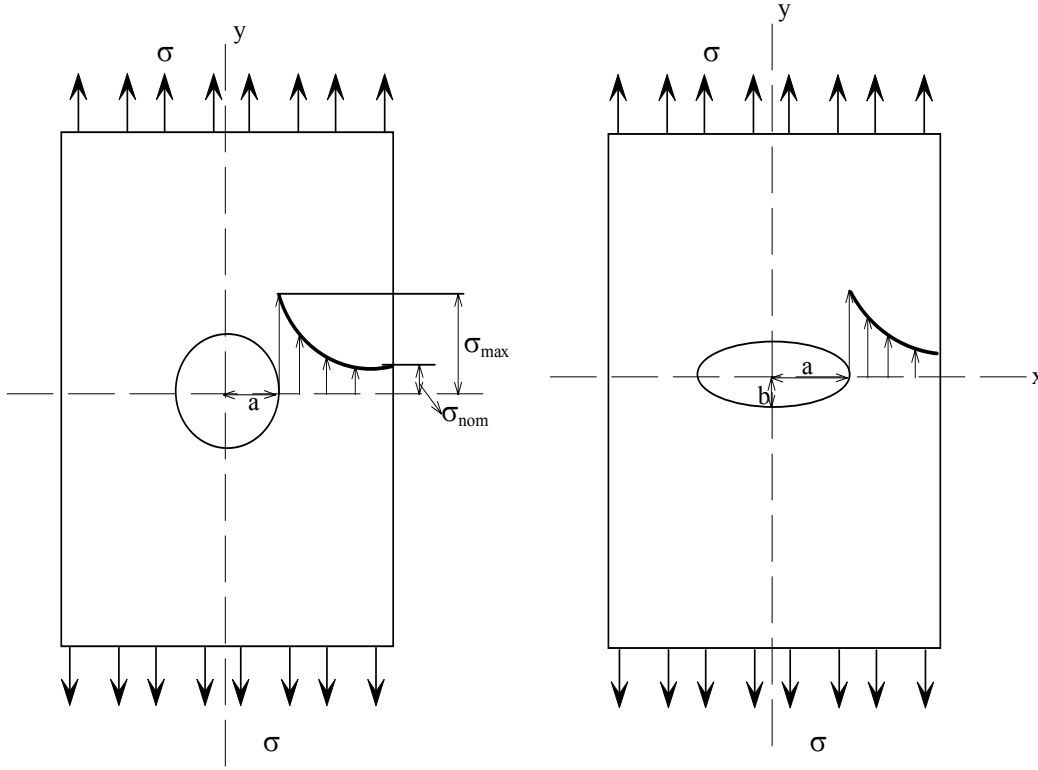
$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (2.4)$$

$K_t$ 'nin tanımlanmasında önemli bir noktada çentik şeklindedir. Şekil 2.26'da gösterilen dairesel ve eliptik çentiklerin ucunda oluşan maksimum gerilme;

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) \quad (2.5)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte a: Deliğin genişliği, b: Deliğin yüksekliğini ifade eder.

Çentiğin ucundaki maksimum gerilmenin değeri çentiğin keskinliğine (a/b) bağlı olarak değişir. Çentik ucundan uzaklaştıkça gerilme yoğunluğu azalır [18].

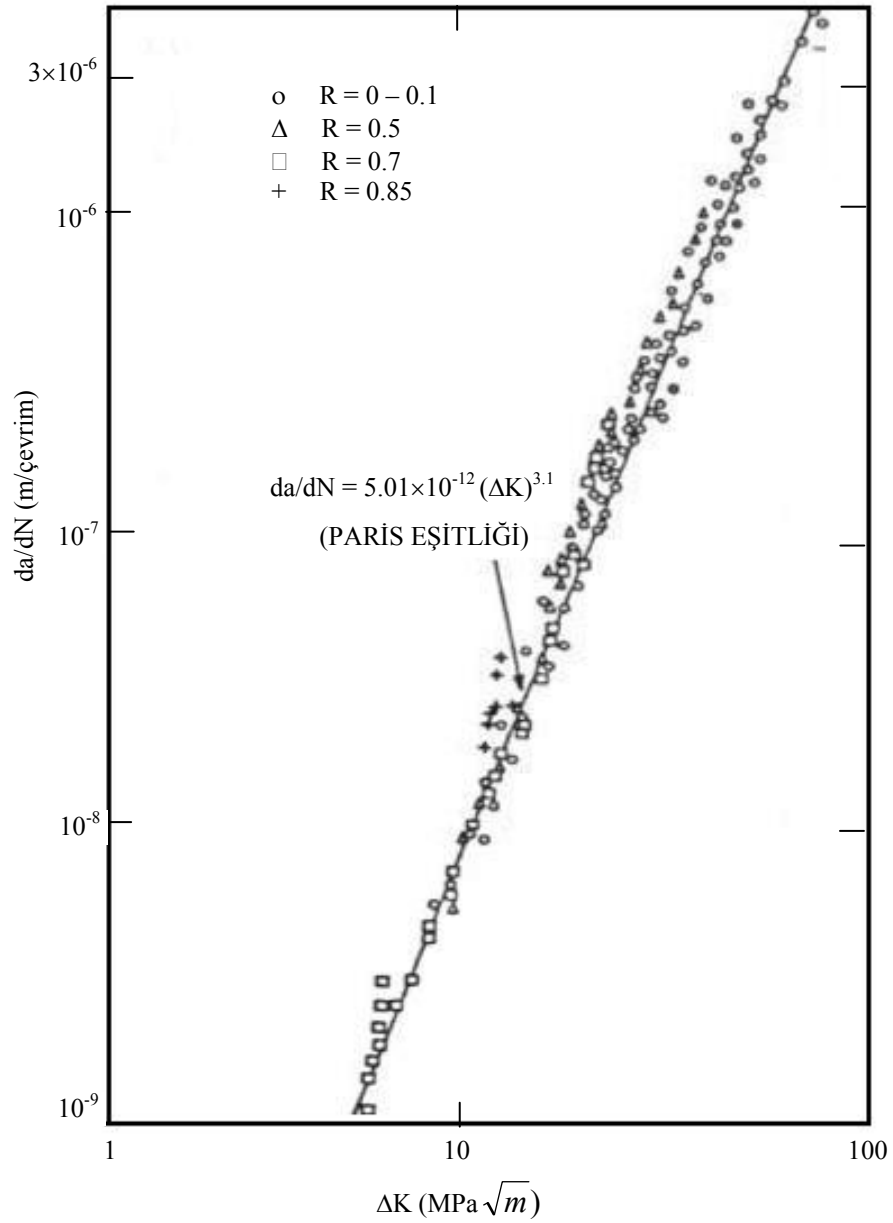


Şekil 2.26. Çentik civarındaki gerilme konsantrasyonunun değişimi [18]

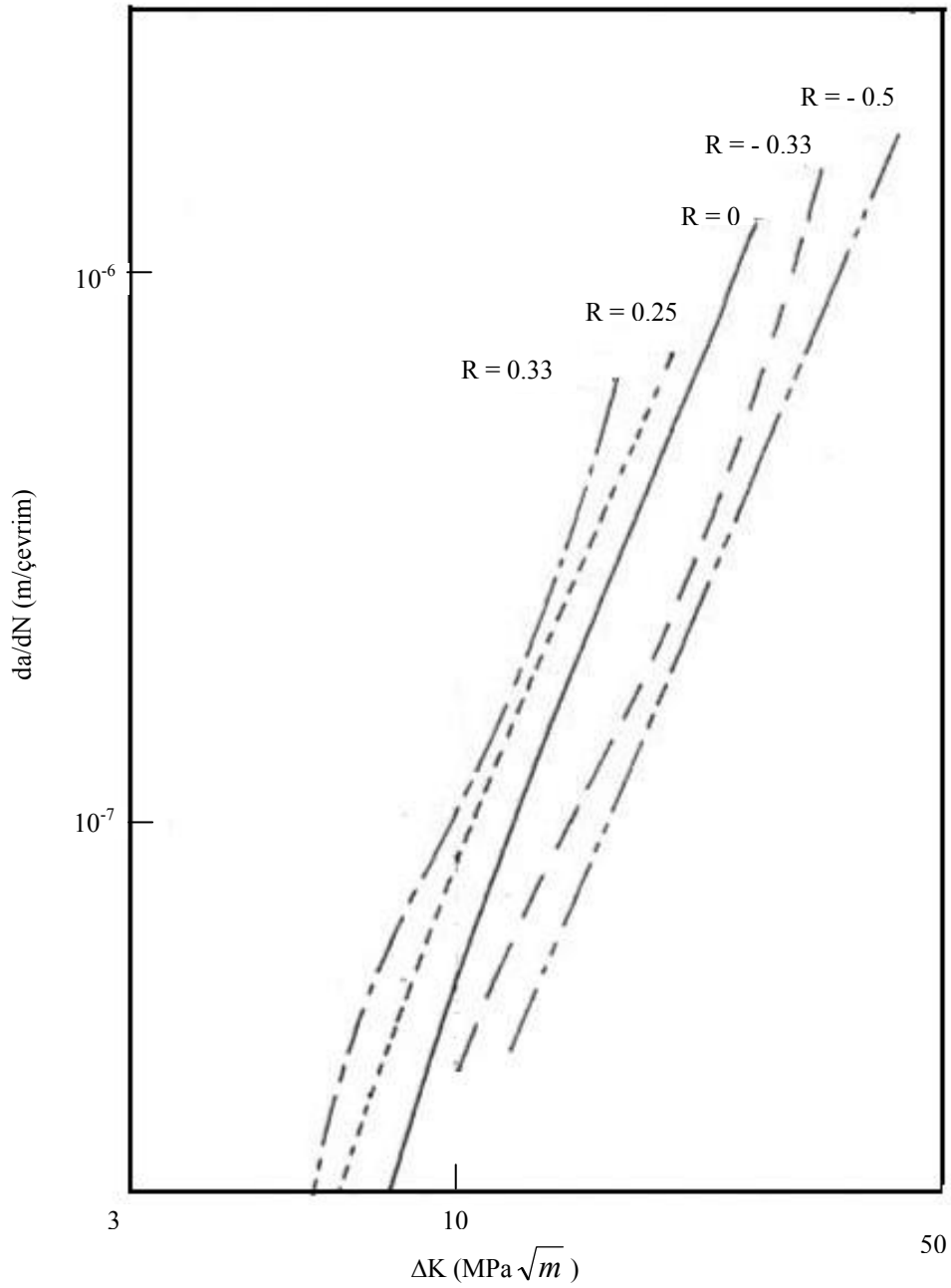
#### 2.4. Gerilme Oranının Çatlak İlerleme Hızına Etkisi

Gerilme oranı (R), çatlak ilerleme hızında önemli bir etkiye sahip olabilir. Gerilme oranı için  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = K_{\min}/K_{\max}$  eşitliği geçerlidir. Genelde sabit bir  $\Delta K$  değeri için daha yüksek R değerlerinde çatlak ilerleme hızı daha yüksek olur. Gerilme oranı hassasiyeti malzemeye bağlıdır [15]. 2024-T3 Alüminyum alaşımı üzerinde yapılan bir çalışma, aynı  $\Delta K$  değerinde R=0.5 oranındaki çatlak ilerleme hızının R=0.1 oranındaki çatlak ilerleme hızından çok daha yüksek olduğunu göstermektedir [20]. Şekil 2.27 ve Şekil 2.28'de gösterildiği gibi iki ayrı

malzemeye ait çeşitli R değerlerindeki  $\Delta K$ - $da/dN$  ilişkisi verilmiştir. Seçilen sabit bir  $\Delta K$  değerinde daha yüksek gerilme oranına (R) sahip malzemede çatlak ilerleme hızı daha yüksektir [14].



Şekil 2.27. BS4360 yapısal çeliğine ait oda sıcaklığında ve 1-10Hz frekanslarında yorulma çatlak ilerlemesi grafiği.  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  [14]



**Şekil 2.28.** 2024-T3 alüminyum alaşımlı kaplamalı bir levhada gerilme oranının (R) yorulma çatlak ilerlemesine etkisi [14]

Gerilme oranı etkisinin tahmininde Forman eşitliği sık kullanılmaktadır.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)(K_c - \Delta K)} \quad \text{Forman eşitliği} \quad (2.6)$$

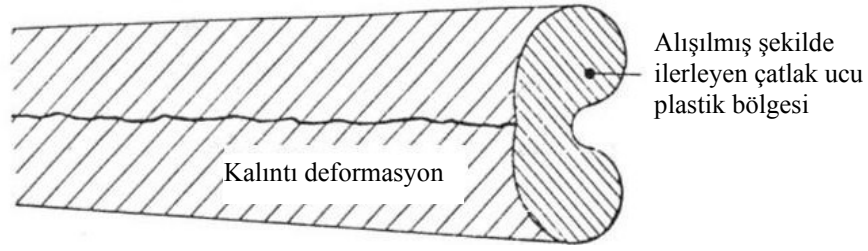
Forman eşitliğine göre gerilme oranı (R) arttıkça çatlak ilerleme hızı (da/dN) artar. Bu yapılan testlerle belirlenmiştir. Forman eşitliği sadece R>0 durumunda geçerlidir. Genellikle R<0 durumundaki çatlak ilerleme hızı, R=0 durumundaki ilerleme hızıyla karşılaştırıldığı zaman önemli bir değişiklik olmadığına inanılır. Ancak burada malzeme çok önemlidir. Bazı araştırmacıların belli malzemeler için elde ettikleri verilere göre R<0 durumunda bu malzemelerde daha yüksek ilerleme hızları gerçekleşmektedir. Yukarıdaki eşitliğin eksikliklerini gidermek için Walker eşitliğinin geçerli olduğu başka bir yöntem kullanılır.

$$\frac{da}{dN} = C \left[ (1-R)^m K_{\max} \right]^n \quad \text{Walker eşitliği} \quad (2.7)$$

Bu eşitliğin kullanımı, belirli bir malzeme için gerilme oranı verilerinin m ve n üst değerlerine uygun olması açısından önemlidir [15]. Aslında bu açıklamalar gerilme oranının (R) etkisini anlatmak için yeterli değildir. Bunun için çatlak kapanması olayının iyi irdelenmesi gerekir [14].

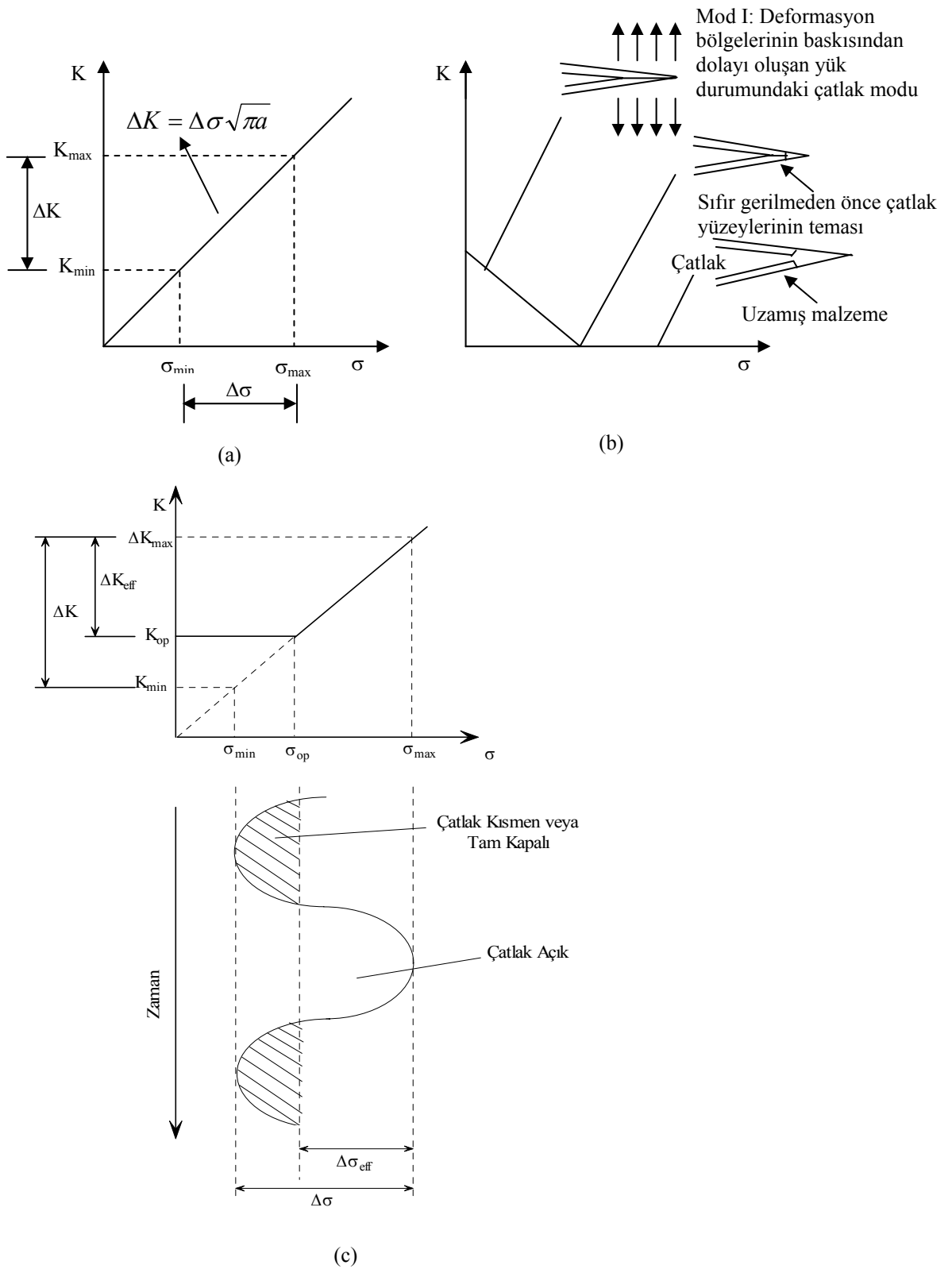
## 2.5. Çatlak Ucu Plastisitesi ve Çatlak Kapanması

1970'lerden önce Elber, gerilme oranı'nın (R) çatlak ilerleme hızına etkisinin açıklanmasına yardımcı olacak çatlak kapanması olgusunu keşfetmişti. Çatlak kapanması çatlak ucu plastisitesinin bir sonucu olarak ortaya çıkar. Her yorulma çatlak çevriminde, yük artışı esnasında çatlak ucunda bir plastik bölge oluşur. Bu bölge yükün uygulanmadığı durumlarda ters yönde oluşur ve yaklaşık olarak yükün uygulandığı durumda oluşan plastik bölgenin ¼'ü kadardır. Böylece malzemede bir kalıntı plastik deformasyon meydana gelir. Bu kalıntı plastik deformasyon çatlak ilerlemesi esnasında malzemede oluşan çatlağın yan yüzeyleri boyunca meydana gelir. Bu, kademeli olarak artan  $\Delta K$  (Gerilme Şiddet Faktörü) ve bu sebepten yine kademeli olarak artan plastik bölgenin boyu için Şekil 2.29'da resmedilmiştir.



Şekil 2.29. Yorulma çatlakları civarındaki plastik deformasyon bölgesi [14]

Kalıntı deformasyon, çekme yükünün sonucu olduğu için çatlak yan yüzeylerinde bulunan malzeme, çatlak yüzeyine dik olarak uzar ve çevresindeki elastik olarak gerilmiş malzemeye birleşir. Bu, çatlak açık olduğu sürece sorun teşkil etmez. Bu durumda çatlak yan yüzeyleri çatlak yüzeyleriyle dik bir yer değiştirme gösterir. Bununla birlikte yorulma yükünün düştüğü durumlarda çatlak kapanma eğilimi gösterir. Bu durumda kalıntı deformasyon önemli hale gelir. Şekil 2.30'da bu durum açıkça görülmektedir. Şekil 2.30 a, Nominal Gerilme Şiddet Faktörüyle (K) uygulanan gerilmenin ( $\sigma$ ) değişimini gösterir. Şekil 2.30 b'de görüldüğü gibi  $\sigma_{max}$  'tan başlayarak malzemeye azalan gerilme şiddeti uygulandığında, çatlak ucundaki elastik rahatlamadan dolayı çatlak ucu açılma açısı düşer. Bununla birlikte çatlak yüzeylerinin paralel konuma gelmesi engellenir. Çünkü sıfır yüke erişilmeden önce gergin malzemenin yan yüzeyleri kapanacaktır. Bu kapanma, bir tepki kuvveti ve uygulanan gerilmenin düşmesiyle artan gerilme şiddetinin oluştuğu Mod I durumunu oluşturur. Mod I durumunda gerilme şiddeti, çatlak hattı yüklemesiyle ilgilidir. Bu yük iç basınç altındaki basınca eşittir. Şekil 2.30 c, uygulanan gerilme ve çatlak kapanmasıyla, gerilme şiddetinin pozisyonunu göstermekte, çatlak açılma gerilmesi ( $\sigma_{op}$ ) değerinin önemini anlatmaktadır.  $\sigma_{op}$ , çatlakın tamamıyla açılması için uygulanan gerilme değeridir.  $\sigma_{op}$  değeri deneysel olarak saptanabilir. Çatlakın kapanması, sertliğin artmasına neden olur. Yorulma çatlaklarının ilerlemesi için çatlakın tamamıyla açık durumda olması gerekir. Böylece Efektif Gerilme Şiddet Faktörü ( $\Delta K_{eff}$ ),  $\sigma_{max} - \sigma_{op}$  olarak tanımlanabilir.  $\Delta K_{eff}$ , nominal  $\Delta K$  değerinden daha küçüktür.



**Şekil 2.30.** Çatlak kapanmasının prensibi: (a) nominal  $K - \sigma$  grafiği, (b) çatlak ucu plastisitesinin sebep olduğu kalıntı deformasyon, (c)  $K$  değerlerinin çatlak kapanmasına etkileri [14]

Daha yüksek değerlerdeki R oranlarında çatlak kapanması daha az olur. Yani  $\Delta K_{eff}$ ,  $\Delta K$  değerine daha yakın olacaktır. Bu yüzden Elber çatlak ilerleme oranlarında R'nin etkisi için  $\Delta K_{eff}$  değerini aşağıdaki gibi yazmıştır:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_{eff}) \quad (2.8)$$

Elber ayrıca  $\Delta K_{eff}$ 'le ilişkili olarak geniş bir aralıktaki R değerleri için çatlak ilerleme oranlarını deneysel yöntemlerden yararlanarak ifade etmiştir.

$$\frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = U = 0.5 + 0.4R \quad (2.9)$$

2024-T3 alüminyum alaşımından elde edilen bu ilişki Schijve tarafından aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir [14].

$$U = 0.55 + 0.35R + 0.1R^2 \quad (2.10)$$

## 2.6. Gerilme Şiddet Faktörü

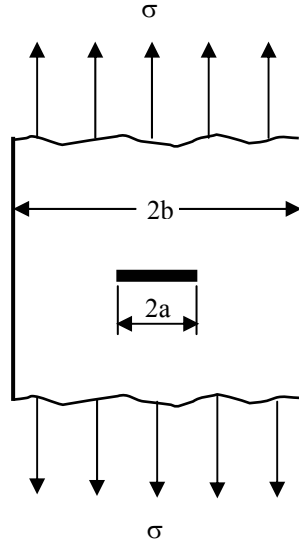
Gerilme şiddet faktörü, çatlak ucu çevresindeki bölgesel gerilmelerin büyüklüğünü ifade eder ve K ile gösterilir. 2.11 eşitliğinde genel bir ifadeyle gösterilen bu faktör, yüke, çatlak boyuna, çatlak şekline ve geometrik sınırlara bağlıdır.

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\Pi a} \quad (2.11)$$

Bu denklemde  $\sigma$  uygulanan gerilme, a çatlak boyu, f(g) ise parça ve çatlak geometrisine bağlı olan düzeltme faktörüdür. şekil 2.31'de gösterilen merkez çatlaklı ve çekme yüküne maruz bir levha için düzeltme faktörü aşağıdaki gibidir [15].



$$f(g) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2b}\right)} \quad (2.12)$$

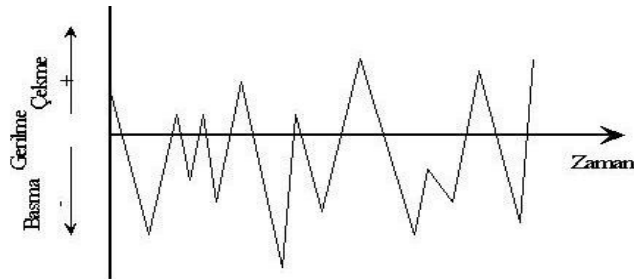


Şekil 2.31. Çekme yönünde gerilmeye maruz merkez çatlaklı levha [15]

## 2.7. Değişken Genlikli Yük Altında Yorulma Çatlak İlerlemesi

Bazı durumlarda sabit genlikli yükler oluşsa da (yolcu uçak kabinlerinde oluşan basınçlandırma çevrimleri, jeneratörlerde ki dönme eğilme gerilmeleri, basınç kaplarındaki termal gerilme çevrimleri) dinamik yüklü yapıların çoğunda, sık sık ve rasgele oluşan değişken genlikli yükleme söz konusudur .

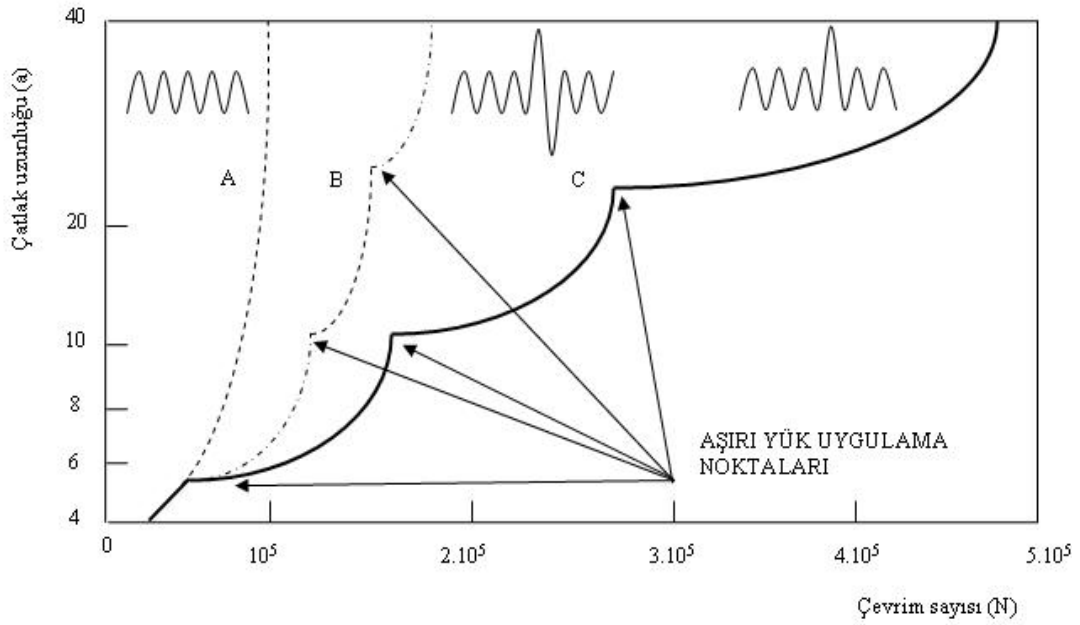
Değişken genlikli yüklemenin en önemli sonucu, artan çatlak uzunluğuna karşın  $\Delta K$  değerinin kademeli olarak artmamasıdır. Şekil 2.32’de görüldüğü gibi küçük ve büyük değerlerdeki yükler birbirleri ardına uygulanmaktadır.



Şekil 2.32. Değişken genlikli yükleme [21]

Bu yüzden  $\Delta K$  değeri ani olarak değişiklik gösterecektir. Bu değişimin, yorulma çatlak ilerleme hızına çok önemli etkisi olur.

Değişken genlikli yüklemeye en basit örnek, sabit genlikli bir yüklemeye ara sıra uygulanan yüksek değerdeki gerilmelerdir. Şekil 2.33, basit iki değişken genlikli yüklemenin, yorulma çatlak ilerlemesine etkilerinin sabit genlikli yüklemeye karşılaştırılmasını göstermektedir.



**Şekil 2.33.** 2024-T3 alüminyum alaşımındaki merkezi çatlaklı bir levha için sabit genlikli yüklemeye ve ara sıra uygulanan aşırı yüklemeye karşılaştırılması [14]

Şekildeki C eğrisinde gösterildiği gibi pozitif tek aşırı yük uygulamasının çatlak ilerlemesine çok büyük etkisi vardır. Bununla birlikte B eğrisinde gösterildiği gibi pozitif aşırı yük ve hemen sonrasında negatif aşırı yük uygulamasının çatlak ilerlemesine etkisi daha azdır. Bu etkilerin açıklamaları aşağıdaki gibi yapılabilir:

(1) Pozitif aşırı yükler (C eğrisi): Her aşırı yük çatlak ucunu normalde uygulanan maksimum yüklere göre daha çok açar, ama bunun yanında çatlak önünde daha büyük bir plastik bölgenin oluşmasına sebep olur. Aşırı yük uygulandıktan sonra normal yük çevrimine döndüğünde üç tane sonuç ortaya çıkar. İlk olarak çatlak kapanma oranı düşer (Çatlak  $\Delta K = \Delta K_{eff}$  eşitliğinin

gerçekleştiği minimum gerilmeye bile tamamen açık durumda olabilir) ve çatlak aşırı yük uygulanmadan önceki durumdan biraz daha hızlı ilerler. Bununla birlikte çatlak kolayca daha büyük plastik bölgenin içine girer ve yüksek kalıntı basma gerilmeleriyle karşılaşır. Çünkü bu plastik bölge elastik özelliğe sahip malzemeyle birleşmiştir. Aşırı yük uygulaması çatlak kapanmasında bir artışa sebep olur ve çatlak ucunun gerisinde oluşan kalıntı deformasyon miktarı artar. Sonuç olarak pozitif tek aşırı yük uygulaması çatlak ilerlemesinde önemli oranda gecikmeye sebep olur. Bununla ilgili daha geniş açıklamalar yapılacaktır.

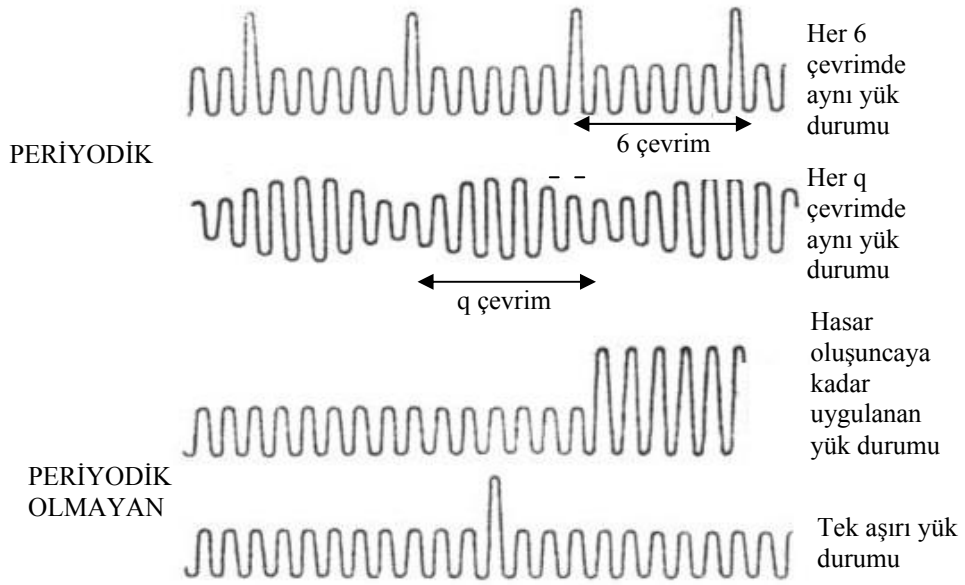
(2) Pozitif + Negatif aşırı yükler (B eğrisi): Mevcut aşırı yük çekme plastik deformasyonunu büyük oranda tersine çevirir. Dolayısıyla pozitif aşırı yükün sebep olduğu çatlak ilerleme gecikmesi büyük oranda azaltılır.

### 2.7.1. Daha karmaşık şekillerdeki değişken genlikli yükleme

Burada amaç, değişken genlikli yüklemeleri belli kategorilere ayırmaktır. Değişken genlikli yüklemeler iki kategoride incelenir:

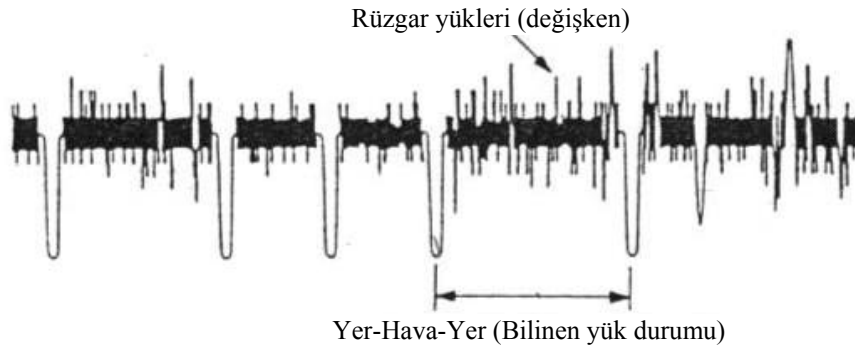
- Periyodik olan değişken genlikli yükleme
- Periyodik olmayan değişken genlikli yükleme

Şekil 2.34'te periyodik ve periyodik olmayan değişken genlikli yük çevrimleri gösterilmektedir. Periyodik yük çevrimlerinin uygulanış sıraları bellidir. Yani yükler rasgele uygulanmaz. Bununla birlikte rasgele uygulanan yük sırasının zamandan bağımsız ve sabit olarak istatistiksel tanımlanması yapılabilirse, bu yükleme de periyodik yükleme gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.34. Periyodik ve Periyodik olmayan değişken genlikli yükleme örnekleri [14]

Pratikte yükler çoğunlukla bilinen ve rasgele uygulanan yüklerin karışımından oluşur. Örneğin bir nakliye uçağının kanadı için yer-hava-yer yük durumları (her uçuşta bir çevrim) ve havadayken maruz kaldığı rasgele etkileyen kuvvetli rüzgarların sebep olduğu yüklerin dağılımı Şekil 2.35'te gösterilmektedir.

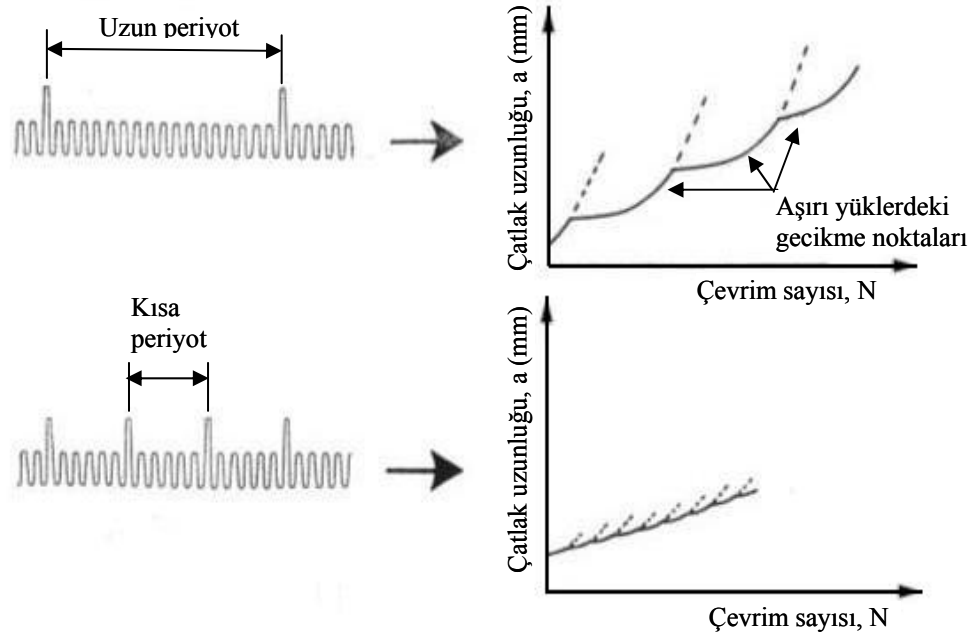


Şekil 2.35. Bir nakliye uçağı için yük durumu [14]

Bu yük karışımlarının istatistiksel tanımlaması zamanla değişmez. O zaman yük sırası periyodik değişken genlikli yükleme gibi sınıflandırılabilir. Pozitif olarak uygulanan aşırı yüklerin çatlak ilerlemesinde gecikmeye sebep

olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda aşırı yüklerin periyodik olarak uygulanma sıklığı da gecikmeyi etkiler. Bu, Şekil 2.36'da açık olarak gösterilmiştir.

Eğer uygulanan aşırı yükler arasındaki periyot uzun olursa çatlak ilerleme eğrisinde geniş süreksizlikler olur. Bu periyot kısaltıldıkça süreksizlik miktarı azalır ve çatlak ilerleme eğrisi düz bir doğru şeklinde olur. Bu durumda da gecikmeler olur ancak bu gecikmeler birbirleri üzerine eklenir. Bu, toplam çatlak ilerlemesinin yavaşlamasında oldukça etkilidir. Bu durumda açıkça söylenebilir ki, değişken genlikli yorulma deneylerinde aşırı yüklerin tekrarlanma periyotları çok önemlidir. Uzun aralıklı periyotlar çatlak ilerlemesinin düzenini bozar ve yapılan deneyler daha karışık hale gelebilir.



Şekil 2.36. Aşırı yüklerin tekrarlanma periyotlarının çatlak ilerleme eğrisine etkileri [14]

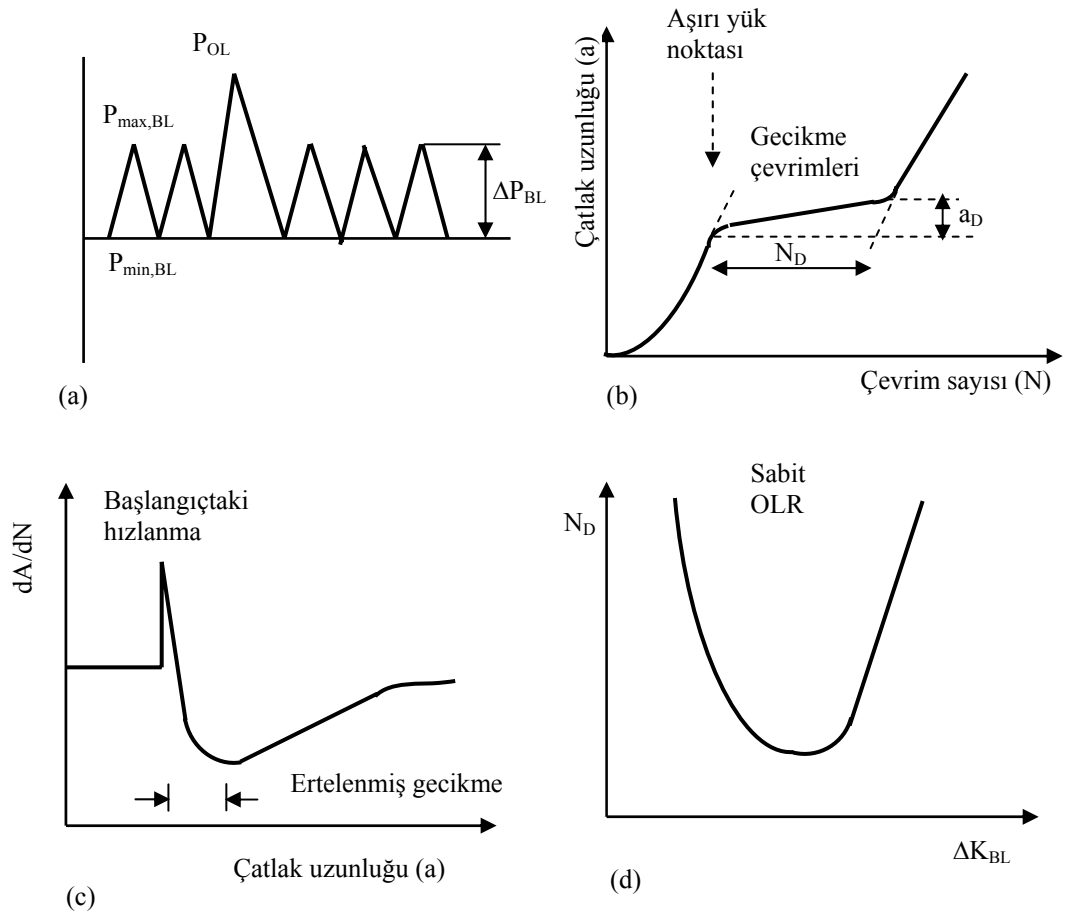
Oysaki kısa aralıklı periyotlar bize, daha sağlıklı yorum yapma imkanı sağlar. Yani çatlak ilerleme davranışını daha kolay saptayabiliriz. Bu farklılıklar bize, değişken genlikli yükleme altında çatlak ilerleme tahmini yaparken seçilecek metotla ilgili yol gösterir [14].

### 2.7.2. Aşırı yük etkilerinin analizleri ve ilgili olgular

Pozitif ve negatif aşırı yükler yorulma çatlak ilerlemesini etkileyerek çatlak ilerleme hızını yavaşlatır ya da hızlandırırlar. Aşırı yük etkileri, ya çatlak ucunun gerisinde plastisite sonucu ortaya çıkan çatlak kapanması, ya çatlak ucu önünde oluşan kalıntı gerilme ya da bu iki etkinin kombinasyonu şeklinde incelenebilir. Çatlak ilerleme hızı pozitif aşırı yüklerden, negatif aşırı yüklerden, değişken genliklerden ve blok yüklerden etkilenir. Pozitif aşırı yükler çatlak ilerlemesini geciktirir. Bu gecikme etkileri, malzemenin akma özellikleri, kayma düzlemleri ve mikro yapısı gibi faktörlere bağlıdır. Pozitif tek aşırı yük ve sebep olduğu gecikme çevrim sayısı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bazı genel gözlemler, Şekil 2.37 yardımıyla aşağıda özetlenmiştir:

- Yorulma çatlak ilerlemesinde negatif aşırı yükler (UL) hızlanmaya sebep olurken, pozitif aşırı yükler (OL) gecikmeye sebep olurlar. Pozitif aşırı yüklerle negatif aşırı yüklerin birlikte uygulanması yük dizilişine bağlı olarak karışık etkilere sebep olurlar. Bu etkileşimler çok komplekstir. Bu tür deneyler ve bu deneylerle ilgili yorumlar çok dikkatli yapılmalıdır [22].
- Gecikmenin büyüklüğü ve mesafesi genellikle Şekil 2.37 b'de görüldüğü gibi gecikme çevrimi ( $N_D$ ) ve gecikme uzunluğu ( $a_D$ ) parametreleriyle ölçülür [23].
- Gecikme etkisi, pozitif aşırı yük oranına ( $OLR=P_{OL}/P_{max,BL}$ ), uygulanan aşırı yükteki  $\Delta K$  değerine ve gerilme oranına ( $R$ ) bağlıdır.
- Pozitif aşırı yükler başlangıçta çok kısa bir hızlanmaya sebep olurlar. Ancak sonrasında Şekil 2.37 c'de görüldüğü gibi önemli bir yavaşlama gerçekleşir. Bu kısa süreli hızlanma sadece yüksek aşırı yük oranında gözlenebilir ve malzemenin akma özelliklerine bağlıdır. Sabit  $\Delta K$  deneylerinde bu hızlanma daha net şekilde görülebilir.

- Çatlak ilerleme hızındaki maksimum yavaşlama, pozitif aşırı yük uygulamasından sonraki kısa bir mesafede oluşur [22]. Bu yavaşlama yaklaşık olarak çatlak, aşırı yükleme plastik bölgesinin 1/8-1/4 uzunluğu kadar ilerlediği zaman gerçekleşir ve bu etki Şekil 2.37 c'de gösterildiği gibi ertelenmiş gecikme olarak adlandırılır [15]. Ertelenmiş gecikme daha önce de belirtildiği gibi aşırı yük oranına (OLR), gerilme şiddet faktörüne ( $\Delta K$ ) ve gerilme oranına (R) bağlıdır.
- Şekil 2.37 d'de görüldüğü gibi eşit değerdeki OLR'ler için  $N_D$ ,  $\Delta K$ 'nın bir fonksiyonu olarak minimum bir değere ulaşır.
- Gecikme, aşırı yükün dağılımı ve çatlak ucunun arkasındaki plastik bölgeye bağlı olarak, çatlak yeni oluşan plastik bölgeyi aşmıncaya kadar devam eder. Bu yüzden  $N_D$ , hem çatlak ucunun gerisindeki plastik bölgeye hem de aşırı yük sonucu oluşan plastik bölgeye bağlıdır.
- Çatlak ucundaki plastisiteyi etkileyen bütün faktörler, aşırı yük etkileri üzerinde dolaylı ya da dolaysız olarak etkili olacaktır. Bunlar malzeme geometrisi, sıcaklık, çevre ve malzeme özellikleridir.



Şekil 2.37. Yorulma çatlak ilerlemesinde aşırı yük etkilerinin gösterilmesi [22]

### 2.7.3. Aşırı yük geciktirmesinin mekanizmaları

Yapılan deneylerde gözlemlenen malzeme davranışlarına göre öne sürülen mekanizmalar aşağıda belirtilmiştir:

- Çatlak ucu körelmesi
- Çatlak sapması, dallanması ve ikincil çatlak
- Çatlak ucu deformasyon sertleşmesi veya çatlak ucu önünde oluşan kalıntı gerilme
- Plastisite sonucu oluşan kapanma

Aşırı yükler, çatlak ucunda körelmeye sebep olur. Bu körelme çatlak ucunun yeniden keskinleşmesi için gereken çatlak ilerlemesi ve çatlak ucu civarındaki gerilmeleri etkiler. Körelme sonucu, çatlak ucundaki gerilmelerin



şiddeti azalacaktır. Çatlak ucundaki körelme, bu bölge aşılıncaya kadar çatlak ilerleme hızını etkileyecektir. Çalışmalar göstermiştir ki; bu etkiler sünek malzemelerdeki yüksek aşırı yük durumunda daha fazla önem kazanmaktadır. Bu mekanizma bazı durumlarda aşırı yükten sonra gözlenen ani hızlanmayı tahmin edemez.

Çatlak sapması, dallanması ve ikincil çatlak durumu, çatlak ilerletici gücü etkiler. Çünkü Mod I'e ilaveten Mod II ve Mod III çatlak açılma durumları da söz konusudur. Bu mekanizmalar, kayma düzlemselliği önemli olan malzemeler için önemlidir ve bu mekanizmalar, mikro yapılarla ya da bazı çevre koşullarıyla açıklanabilir. Çatlağın kıvrımlı olması sonucu oluşan tortular, pürüzlülüğün sebep olduğu çatlak kapanmasına öncülük ederler.

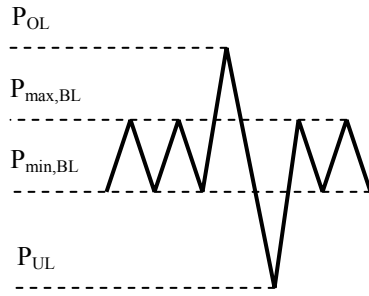
Çatlak ucu deformasyon sertleşmesi, akma gerilmesinin yükselmesiyle kayma başlangıcını etkiler. Bu, çatlak ilerlemesinin kaymayla aktif hale gelmesi durumunda, ilerlemeyi geciktirir. Diğer taraftan eğer çatlak gevrek tipteki mekanizmada ilerlerse, çalışma esnasında oluşan sertleşme ters etkiye sebep olabilir. Gerçekte deformasyon sertleşmesinin etkileri, kalıntı basma gerilmelerin etkilerinden farklı değildir. İkisi de görünüşte aynıdır ama ifadelerinde küçük farklılıklar vardır. Aşırı yük esnasında oluşan büyük boyuttaki plastik bölge, çatlak ucunda ters yönde bir kuvvet oluşturur. Bundan dolayı bir sonraki kayma, plastisite boyunca oluşan bu kuvveti yenmek zorundadır. Bu, akma gerilmesinin yükselmesine sebep olan deformasyon sertleşmesiyle açıklanır. Aynı güç, çatlak ucundaki ilerletici gücü engelleyerek, çatlağın uzamasını sağlayan etkin gücün azalmasına sebep olur [22]. Tek pozitif aşırı yükten sonraki sabit genlikli yükleme sırasında çatlak ucu önündeki küçük bir bölgede, basma kalıntı gerilmeleri oluşur. Ölçümler göstermiştir ki; bu bölgenin aşırı yükten sonraki boyu daima önceki boyundan daha büyüktür ve büyüklüğü yaklaşık olarak akma gerilmesi kadardır. Schijve ve Broek'e göre, uygulanan gerilmelerin üzerine aşırı yükte oluşan basma kalıntı gerilmelerin bindirilmesi, kalıntı gerilme bölgesi içindeki çatlak ilerlemesini geciktiren bölgesel gerilme oranını düşürür [24]. Birkaç araştırmacı, çatlak ucu önünde oluşan kalıntı gerilmenin çatlak gecikmesine sebep olduğunu öne sürmüştür. Drew, Ling ve Schijve, deney sırasında oluşan ve gecikmede büyük rolü olan kalıntı gerilmelerin, aşırı yükten sonra uygulanan tavlama

işlemleriyle, giderilebileceğini söylemişlerdir. Wheeler, aşırı yüklerle ilgili olarak  $\Delta K$  ve  $K_{max}$ 'ın etkilerini incelemiştir. Schijve ve diğerleri bu etkileri analiz etmişlerdir. Onlara göre kalıntı gerilmeler, hem  $K_{max}$  hem de  $K_{min}$  değerini eşit şekilde etkiler, bu yüzden çatlak ilerletici güç ( $\Delta K$ ) etkili değildir [22]. Kalıntı gerilmelerle ilgili diğer bir ifade de, çatlak ilerlemesini hızlandıran negatif aşırı yük sonrası çatlak ucu önünde oluşan çekme kalıntı gerilmesidir. Pozitif aşırı yük uygulamasından sonra çatlak ucunda bir basma kalıntı gerilme bölgesi oluşmalıdır. Çünkü plastik bölge içerisindeki gerilmiş malzeme, plastik bölgenin dışındaki elastik bölgeye çıkmamak için direnir. Diğer taraftan çekme kalıntı gerilmesi, negatif aşırı yükten sonra çatlak ucu yakınında oluşan sıkıştırma kuvvetini yenmek zorundadır [24].

Plastisite daima çatlakı kapatmak yerine açar. Riemelmoser ve Pippan'ın son zamanlarda yapmış olduğu analizler göstermiştir ki, plastisite, bir miktar kapanmaya katkıda bulunabilir. Aşırı yük plastisitesinin çatlak ucunda meydana gelmesi gerektiğinden, plastisite sonucu oluşan kapanma, çatlakın bir miktar ileri doğru hareketinden sonra kendini gösterir. Böylece ertelenmiş gecikme, plastisite sonucu oluşan kapanmayla açıklanabilir. Ayrıca kalıntı gerilmelerden farklı olarak kapanma, sadece  $K_{max}$ 'ı değil genliği de etkiler. Bunun sonucunda çatlak ucundaki ilerletici güç düşer ve kapanma  $\Delta K$  cinsinden ölçülebilir. Bundan başka plastisite sonucu oluşan kapanma, çatlak plastik bölgenin dışına çıksa bile direnç göstermeye devam eder. Plastisite sonucu oluşan kapanma yorulma konusuyla ilgilenen birçok komite tarafından desteklenmiştir [22].

#### 2.7.4. Yük etkileşimleri

Değişken genlikli yük altında yorulma çatlak ilerlemesi göz önüne alındığında, yük etkileşim terimi, belli bir çevrimde, aynı maksimum ve minimum gerilme şiddetinde çatlak ilerleme artışının sabit genlikli yüklemdeki artıştan farklı olduğunu açıklamaya çalışan bir kavramdır. Şekil 2.38'de birbiri ardına uygulanan basit bir OL-UL yük durumu ve ilişkili bağıntılar verilmiştir.



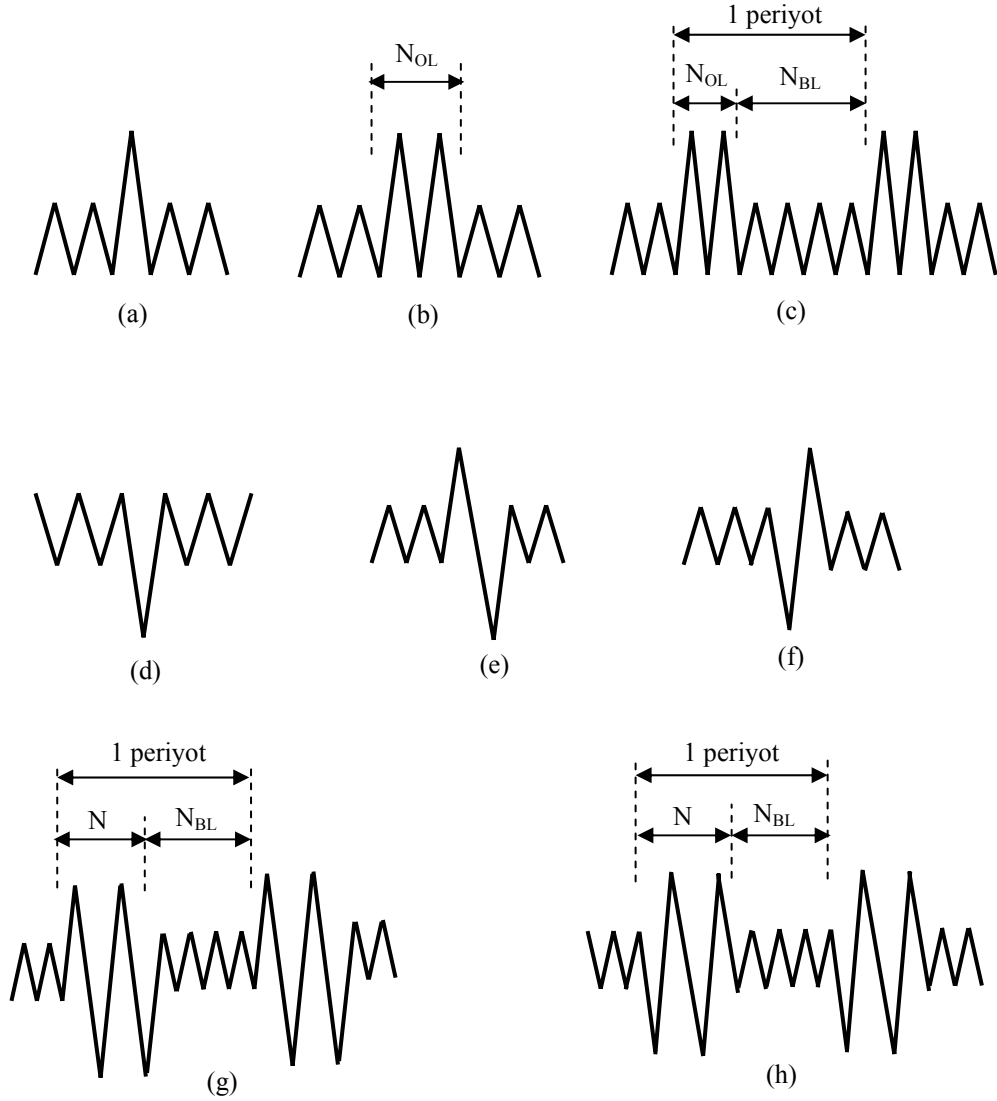
Şekil 2.38. Değişken genlikli bir yük çevrimindeki yük parametreleri [23]

$$\Delta P_{BL} = P_{\max,BL} - P_{\min,BL} \quad (2.13)$$

$$OLR = \frac{P_{OL} - P_{\min,BL}}{\Delta P_{BL}} \quad (2.14)$$

$$ULR = \frac{P_{\max,BL} - P_{UL}}{\Delta P_{BL}} \quad (2.15)$$

Şekil 2.39'da ise OL ve UL yükleriyle oluşturulmuş basit değişken genlikli yükleme tipleri gösterilmektedir. Şekil 2.39 a'da gösterilen tek aşırı yük durumunda daha önce de bahsedildiği gibi çatlak ilerlemesinde bir gecikme olur. Aşırı yük oranının (OLR) daha yüksek olması durumunda ise bu gecikme daha da artar. OLR değerinin artması,  $N_D$  ve  $a_D$  değerlerinin artmasına ve  $(da/dN)$  seviyesinin minimuma düşmesine sebep olur. Ancak gerilme oranı (R) artarsa gecikme etkisi azalır. Şekil 2.39 b'de gösterilen aşırı yüklerin blok yüklemesinde ise gecikme, tek aşırı yüke göre daha büyük oranda ve daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Şekil 2.39 c'de gösterilen periyodik olarak uygulanan blok aşırı yükleme durumunda, çatlak ilerleme hızı, yük ve malzeme parametrelerine bağlı olarak, sabit genlikli yükleme durumuna göre daha hızlı veya daha yavaş olabilir. Alüminyum alaşımında, tek aşırı yükün periyodik olarak çok sık uygulandığı durumlarda, çatlak ilerleme hızı, sabit genlikli yüklemedeki çatlak ilerleme hızından daha yüksek olur.

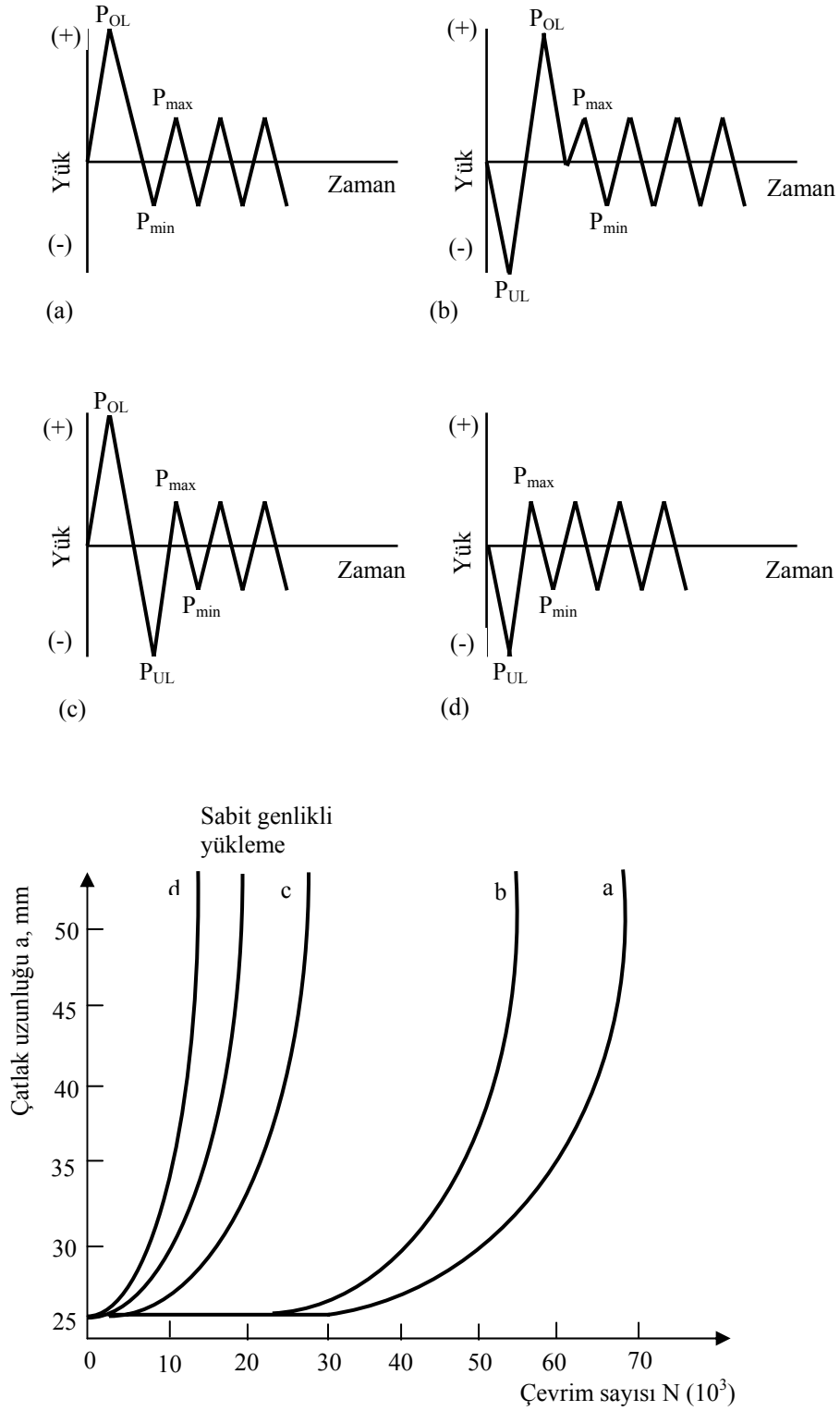


**Şekil 2.39.** OL ve UL yüklemeleriyle oluşturulmuş basit değişken genlikli yükleme örnekleri: (a) tek OL; (b) blok OL; (c) periyodik olarak uygulanan blok OL; (d) tek UL; (e) tek OL-UL (f) tek UL-OL; (g) periyodik olarak uygulanan blok OL-UL; (h) periyodik olarak uygulanan blok UL-OL [23]

Diğer bütün parametreler (gerilme oranı, gerilme şiddeti v.b.) sabit kalmak şartıyla, tek aşırı yük ya da blok yüklerin periyodik yüklemesi durumunda, bu yüklemeler arasında kalan sabit yükleme çevrim sayısı ( $N_{BL}$ ) yükseldikçe, daha büyük oranda gecikme olur [23]. Şekil 2.39 d’de gösterilen negatif tek aşırı yük uygulamasında, çatlak ucundaki kalıntı gerilme alanının değişmesi ve kapanmanın

azalması sonucu çatlak ilerlemesinde bir hızlanma olur. Uygulanan bu aşırı basma yükü, çekme kalıntı gerilme bölgesi içinde bir çekme gerilme şiddeti ( $\Delta K$ ) doğurur. Bu da çatlak ilerletmeye çalışır. UL değerinin artmasıyla çatlak açılma yükü ( $K_{op}$ ), düşer [24]. Birbirini takip eden basit OL ve UL yük kombinasyonlarında yapılan testler göstermiştir ki; OL yükünden hemen sonra uygulanan UL yükleme durumunda, OL yükünden sonra oluşan gecikme, UL yükünden hemen sonra uygulanan OL yük durumuna göre daha büyük oranda azalır. Genellikle alüminyum alaşımlarında, Şekil 2.39 e ve g'de gösterilen yük durumlarındaki çatlak ilerleme hızı, Şekil 2.39 f ve h'deki yük durumlarındaki hızdan daha yüksek olur

Şekil 2.40'ta 2024-T3 alüminyum alaşımı için OL ve UL yüklerinin kullanıldığı yük kombinasyonları ve bu yüklemeler sonucu oluşan çatlak ilerleme hızlarının sabit genlikli yükleme sonucunda gerçekleşen çatlak ilerleme hızıyla karşılaştırılması gösterilmektedir [23].



Şekil 2.40. 2024-T3 alüminyum alaşımında OL yüklemesi sonrası oluşan gecikmeye UL yüklemesinin etkileri [23]

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan yorulma deneylerinde 2024-T3 alüminyum alaşımının sabit genlikli yükleme altındaki yorulma çatlak ilerleme hızının, değişik şekillerde gerçekleştirilen değişken genlikli deneyler sonucu oluşan yorulma çatlak ilerleme hızıyla karşılaştırılması incelenmiştir. Öncelikle 2024-T3 alüminyum alaşımının sabit genlikli yükleme altındaki çatlak ilerleme hızı deneyi yapılmıştır. Daha sonra sırasıyla pozitif tek aşırı yük (OL), negatif tek aşırı yük (UL), aynı aşırı yük oranlarında (OLR=ULR) negatif tek aşırı yükten hemen sonra uygulanan pozitif tek aşırı yük (UL+OL) ve pozitif tek aşırı yük oranı (OLR) sabit tutularak hemen arkasından uygulanan değişik oranlardaki negatif tek aşırı yük (OL+UL) yorulma deneyleri yapılmıştır.

#### 3.1. Deney Malzemesinin Özellikleri ve Geometrisi

Yorulma deneylerinde 2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Numuneler giyotin makasla plakalar halinde kesilmiştir. Bu işlem yapılmadan önce malzemenin soğuk işlem (haddeleme) yönü belirlenmiştir. Bu işlem yüzeyi parlatılmış malzemenin üzerine Keller dağlayıcısı uygulanarak yapılmıştır. Keller dağlayıcısı; 2 ml HNO<sub>3</sub>, 1,5 ml HCl, 1 ml HF ve 95 ml saf su içermektedir. Bu işlem sonunda malzemelerin tümü haddeleme yönü çatlak ilerlemesine paralel olacak şekilde kesilmiştir. Çizelge 3.1 ve 3.2’de 2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri verilmektedir. Aşağıda görüldüğü gibi bu malzemenin bileşiminde alüminyum dışında ağırlıklı olarak bakır ve manganez bulunmaktadır.

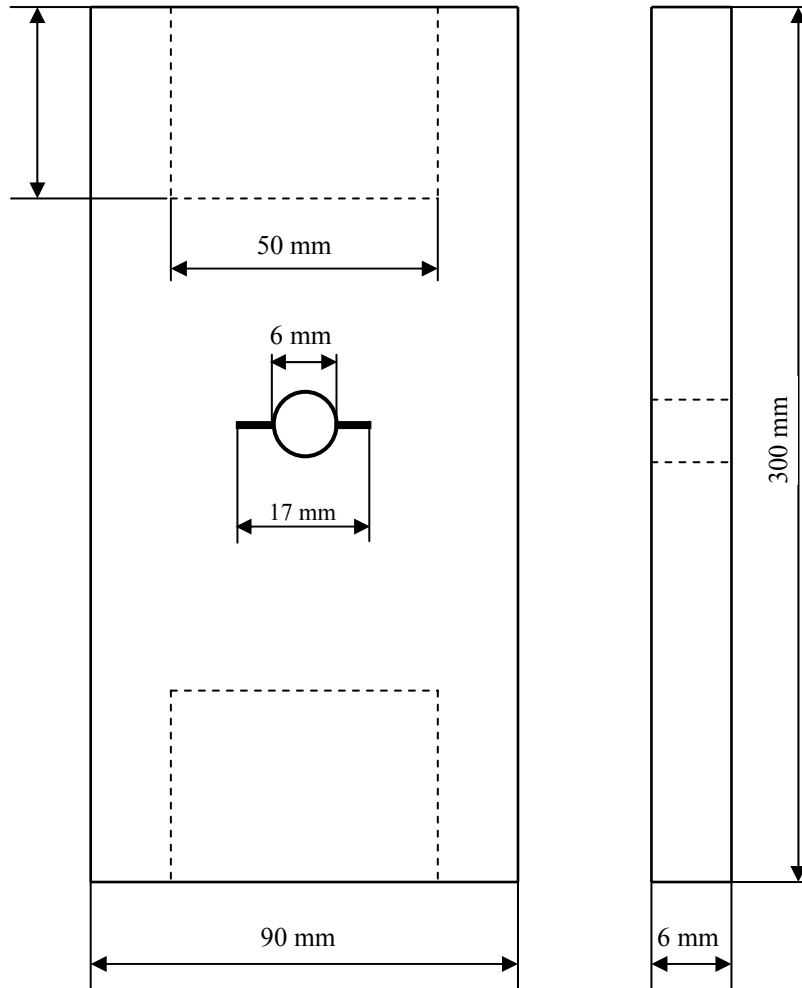
**Çizelge 3.1.** 2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% olarak ağırlık) [25]

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Cr	Al
3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5 (max)	0.5 (max)	0.15 (max)	0.1 (max)	93.5

**Çizelge 3.2.** 2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri [25]

Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	50 mm'de % olarak uzama
485	345	18

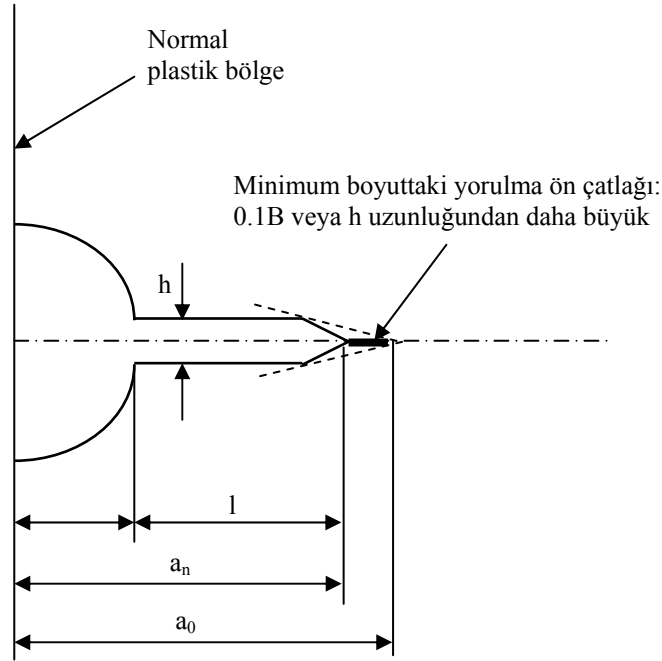
Numuneler ASTM E-647 standardına göre hazırlanmıştır. Şekil 3.1'de gösterilen 6 mm delik açılmış plaka halindeki merkez çatlaklı malzemelere (MT) çentik açma cihazıyla (Dremel) ASTM E-647'de belirtilmiş ölçülerde çentik açılmıştır.



**Şekil 3.1.** Merkez çatlaklı (MT) 2024-T3 alüminyum alaşımlı malzemenin geometrisi



Şekil 3.2’de gösterilen bu çentiğin açılmasında Dremel cihazının ucuna 23.5 mm çaplı bir kesici disk bağlanmıştır. Çentik açımı sırasında çentiğin boyutları ve malzemeye olan paralelliğine titizlik gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Merkez çatlaklı malzemenin çentik ölçüleri ve minimum yorulma ön çatlağının boyutu [26]

Şekil 3.2’de gösterilen yorulma ön çatlağının amacı çentik etkilerinden kurtulmaktır ve bütün numunelere uygulanmıştır. Yukarıda gösterilen B, parça kalınlığını ifade etmektedir.

### 3.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Yorulma deneyleri Şekil 3.3’teki Instron (8500 model) test cihazında gerçekleştirilmiştir. Instron cihazı 200 kN statik, 100 kN dinamik yük kapasiteli olup bilgisayarla kumanda edilebilmektedir. Bu cihazdaki yorulma deneyleri, bilgisayardaki MAX paket programı kullanılarak yapılmıştır. Bu programda deneyler, ortalama yük, genlik, frekans ve çevrim sayısı değerleri girilerek yapılmaktadır. Numune bağlanırken, kavrama çenelerine uygulanan hidrolik

gücün, her iki çene için de eşit olmasına ve numunenin çene eksenine paralel olarak bağlanmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 3.3. Yorulma deneylerinde kullanılan Instron cihazı

Deney numunesinin delik kenarlarına çentik açmak için Dremel cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın ucundaki kesici diskin çapı 23.5 mm'dir. Çentik açarken, çentik boyunun ve genişliğinin merkezdeki deliğin her iki tarafında da eşit olmasına dikkat edilmiştir.

Deney sırasındaki çatlak ilerlemesinin gözlenmesi için gezici optik mikroskop kullanılmıştır. Ölçümler yapılırken mikroskop okusündeki x-y eksenlerinden y eksenine çentik ucuna getirilerek belli zaman aralıklarındaki çatlak uzunluğu ölçülmüştür. Ölçümler yaklaşık olarak 1 mm'lik bir çatlak uzunluğu içerisinde 4-5 defa ölçü alınarak gerçekleştirilmiştir.

Yorulma çatlağının ilerlemesini daha iyi görebilmek için malzeme yüzeyi çatlak ilerlemesine dik yönde parlatılmıştır. Ayrıca çatlak ilerleme ölçümleri yapılırken parlak ışık kullanılmıştır.

### 3.3. Yapılan Yorulma Deneyleri

#### 3.3.1. Sabit genlikli yorulma deneyi

Sabit genlikli yorulma deneyi, sinüs eğrisi şeklinde, yük kontrollü ve gerilme oranı (R) 0.11 olacak şekilde yapılmıştır. Uygulanan yükler ve frekans Çizelge 3.3'te verilmektedir. Bu yük ve frekans değerleri MAX paket programında bilgisayara girildikten sonra deney başlatılmış ve deney numunesi kopuncaya kadar devam ettirilmiştir. Deney esnasında bir ön çatlak oluşturulduktan sonra belli aralıklarla çatlak uzunluğu ölçümleri yapılmıştır. Böylelikle sabit genlikli yükleme altında 2024-T3 alüminyum alaşımının çatlak ilerleme hızı belirlenmiştir. Bu deney daha sonra aynı malzeme üzerinde gerçekleştirilen değişken genlikli yorulma deneyleriyle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.3. Sabit genlikli yüklemdeki yük ve frekans değerleri

Deney adı	$P_{max}$ (kN)	$P_{min}$ (kN)	Frekans (Hertz)
Sabit Genlik	27	3	10

#### 3.3.2. Değişken genlikli yorulma deneyleri

Değişken genlikli yorulma deneylerinde, sabit genlikli yorulma deneyinde uygulanan yük ve frekans değerleri aynı olmak kaydıyla sırasıyla pozitif tek aşırı yük (OL), negatif tek aşırı yük (UL), negatif tek aşırı yükün hemen akabinde uygulanan pozitif tek aşırı yük (UL+OL) ve pozitif tek aşırı yükten hemen sonra uygulanan negatif tek aşırı yük (OL+UL) yorulma deneyleri yapılmıştır. Sabit genlikli yüklemde frekans 10 Hz uygulanırken aşırı yük uygulamalarında bu değer 1 Hz olarak alınmıştır. Deneyler sabit genlikli yorulma deneyinde olduğu

gibi yük kontrollü olarak yapılmıştır ve uygulanan yük sinüs eğrisi şeklindedir. Gerilme oranı 0.11 olarak alınmıştır. Her bir deney için aşırı yük oranları ve bu oranlarda uygulanan maksimum ve minimum yükler Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

**Çizelge 3.4.** Değişken genlikli yüklemdeki yük değerleri

Numune adı	OLR	ULR	P <sub>max</sub> (kN)	P <sub>min</sub> (kN)
OL	2	-	51	3
UL	-	2	27	-21
UL+OL	2	2	51	-21
OL+UL1	2	2	51	-21
OL+UL2	2	1.7	51	-14
OL+UL3	2	1.4	51	-6.5

Yapılan deneyler sonucunda, sabit genlikli yorulmaya göre gerçekleşen gecikme ya da hızlanmaların doğru şekilde belirlenebilmesi için aşırı yükler her deney için eşit çatlak uzunluklarında (2a=29 mm) uygulanmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken aşırı yükün uygulandığı çatlak uzunluğu olan 2a=29 mm ile 2a=55 mm'lik çatlak uzunlukları arasındaki çevrim sayıları hesaplanmıştır. Bu mesafeler arasındaki çevrim sayıları, sabit genlikli yorulma deneyindeki çevrim sayısı ile karşılaştırılarak uygulanan aşırı yüklerin sebep olduğu gecikmeler ve hızlanmalar belirlenmiştir.

### 3.3.3. Hesaplamalarda kullanılan eşitlikler

Her bir çatlak uzunluğundaki gerilme şiddet faktörü ( $\Delta K$ ) hesaplanırken ASTM E-647 standartlarında merkez çatlaklı (MT) levha için belirtilmiş olan Eşitlik 3.1 kullanılmıştır.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\Pi \alpha}{2W} \sec \frac{\Pi \alpha}{2}} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte; B: Numune kalınlığı, W: Numune genişliği,  $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$  ( $R > 0$  için) ve  $\alpha = 2a/W$ 'dir [28].

Yorulma çatlak ilerleme hızının kolayca hesaplanabilmesi için ASTM E-647'de tavsiye edilen Eşitlik 3.2'deki secant metodu [28] kullanılmıştır.

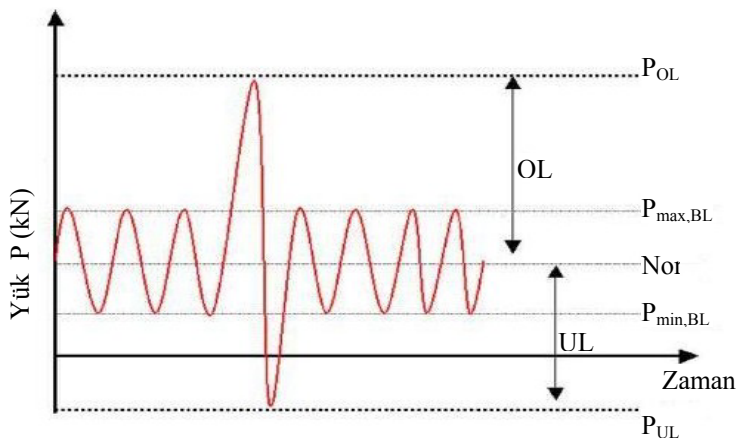
$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3.2)$$

Ayrıca Şekil 3.4'deki yükleme tipi esas alınarak Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4'deki pozitif aşırı yük oranı (OLR) ve negatif aşırı yük oranı (ULR) hesaplamaları yapılmıştır [23].

$$OLR = \frac{P_{OL} - P_{\min, BL}}{\Delta P_{BL}} \quad (3.3)$$

$$ULR = \frac{P_{\max, BL} - P_{UL}}{\Delta P_{BL}} \quad (3.4)$$

Eşitlikte görülen  $\Delta P_{BL}$  değeri,  $P_{\max, BL}$  ve  $P_{\min, BL}$  arasındaki farka eşittir.

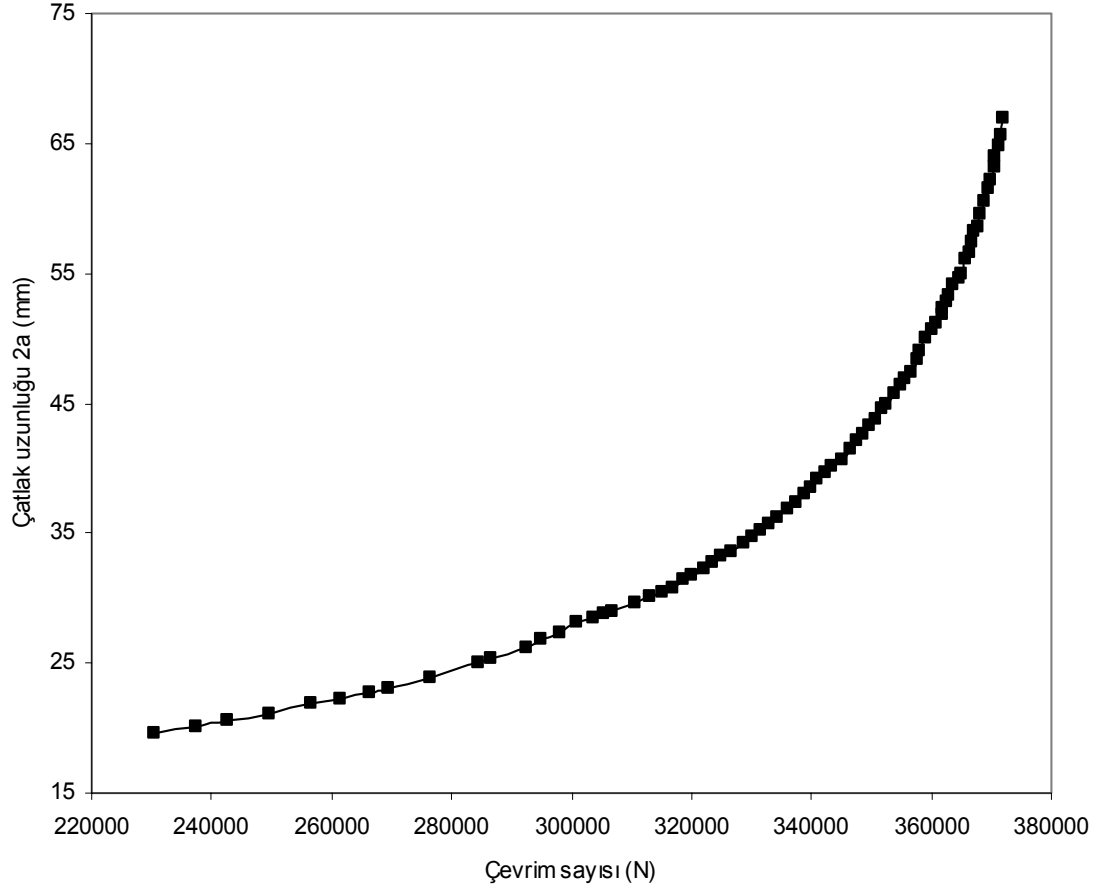


Şekil 3.4. Pozitif ve negatif aşırı yük terimlerinin şematik olarak gösterimi [27]

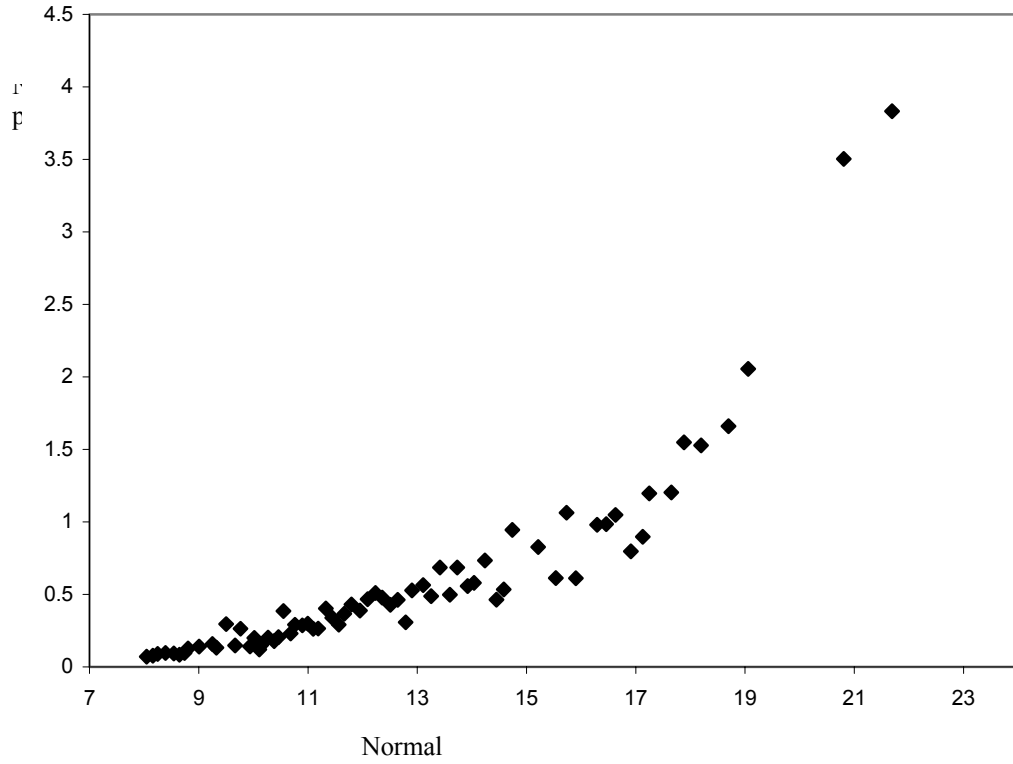
## 4. SONUÇLAR

### 4.1. Sabit Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları

Sabit genlikli yorulma deneyi sırasında belli aralıklarla kaydedilen çevrim sayısı ( $N$ ) ve çatlak uzunluğu ( $2a$ ) verileri kullanılarak Şekil 4.1'deki grafik çıkartılmıştır. Ayrıca her bir nokta için Eşitlik 3.1 kullanılarak gerilme şiddet faktörleri ( $\Delta K$ ) ve Eşitlik 3.2 kullanılarak çatlak ilerleme hızları ( $da/dN$ ) hesaplanarak Şekil 4.2'deki grafik çıkartılmıştır.  $2a=29-55$  mm'lik çatlak uzunlukları arasındaki toplam çevrim sayısı ( $\Delta N$ ) hesaplanmıştır. Bunun amacı, daha sonradan yapılan değişken genlikli yorulma deneylerinde aynı mesafeler arasındaki çevrim sayılarıyla bu çevrim sayısını karşılaştırarak çatlak ilerlemesindeki hızlanma ya da yavaşlamaları tespit etmektir. Sabit Genlik isimindeki deneyde  $2a=29-55$  mm'lik mesafeler arasındaki toplam çevrim sayısı ( $N_{top}$ ) 58051 olarak hesaplanmıştır. Yapılan sabit genlikli yorulma deneyinde çatlak ilerleme hızının ve gerilme şiddet faktörünün artan çatlak uzunluğuyla birlikte arttığı görülmüştür. Yapılan bütün deneylerin  $2a-N$  verileri Ek-1'de gösterilmektedir.



**Şekil 4.1.** 2024-T3 alüminyum alaşımına ait sabit genlikli yükleme altında yapılan Sabit Genlik deneyine ait çatlak uzunluğu (2a)-çevrim sayısı (N) grafiği



**Şekil 4.2.** 2024-T3 alüminyum alaşımına ait sabit genlikli yükleme altında yapılan Sabit Genlik deneyinin çatlak ilerleme hızı (da/dN)-gerilme şiddet faktörü ( $\Delta K$ ) grafiği

#### 4.2. Değişken Genlikli Yorulma Deneyi Sonuçları

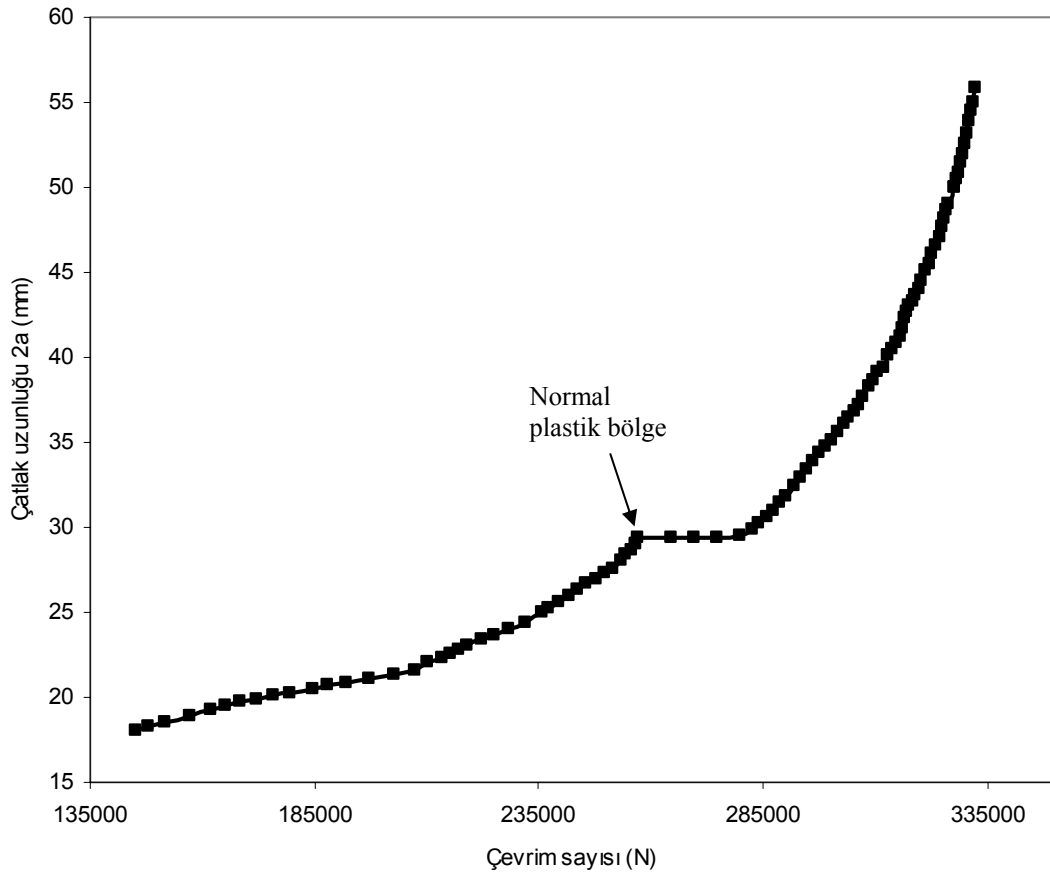
Yapılan değişken genlikli yorulma deneyleri sonucunda oluşan gecikme ( $N_D$ ) ve hızlanmaların ( $N_A$ ) gösterildiği çizelge aşağıda verilmiştir. Deneylerde gerilme oranı 0.11, sabit genlikli yükleme frekans değeri 10 Hz ve aşırı yük frekans değeri 1 Hz olarak alınmıştır. Gecikme ya da hızlanmaların açık bir şekilde belirlenebilmesi için bütün deneylerde belirli bir çatlak uzunluğu arasındaki çevrim sayıları hesaplanarak Sabit Genlik deneyindeki çevrim sayısı ile karşılaştırılmıştır.



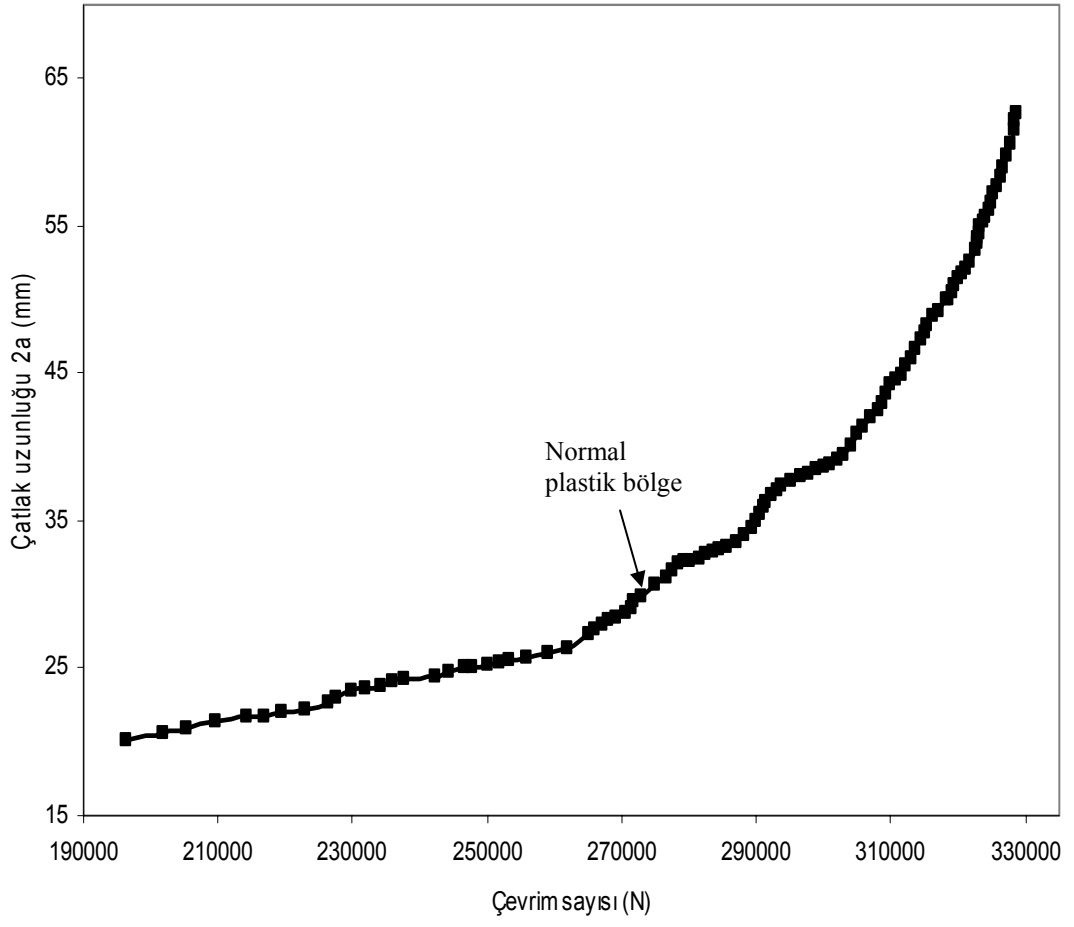
Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi OLR=2’de yapılan pozitif tek aşırı yük (OL) deneyinde maksimum gecikme gerçekleşmiştir. Aynı gerilme oranında yapılan negatif tek aşırı yük (UL) deneyinde ise, sabit genlikli yüklemeye göre çatlak ilerlemesinde hızlanma olmuştur. UL+OL deneyinde yine büyük bir gecikme olmuştur ama bu gecikme OL deneyindeki gecikmeye göre daha az olmuştur. Daha sonra OLR=2 değeri sabit tutularak yapılan OL+UL deneylerinde ise negatif aşırı yük oranı düştükçe gecikmenin arttığı görülmektedir. yapılan Değişken genlikli yorulma deneylerine ait 2a-N grafikleri Şekil 4.3-8’de gösterilmektedir. Bu grafiklerde aşırı yük uygulandıktan sonra çatlak ilerleme hızında oluşan değişim açıkça görülmektedir.

**Çizelge 4.1.** Değişken genlikli yorulma deneyleri sonucu oluşan gecikme ve hızlanmaların gösterilmesi

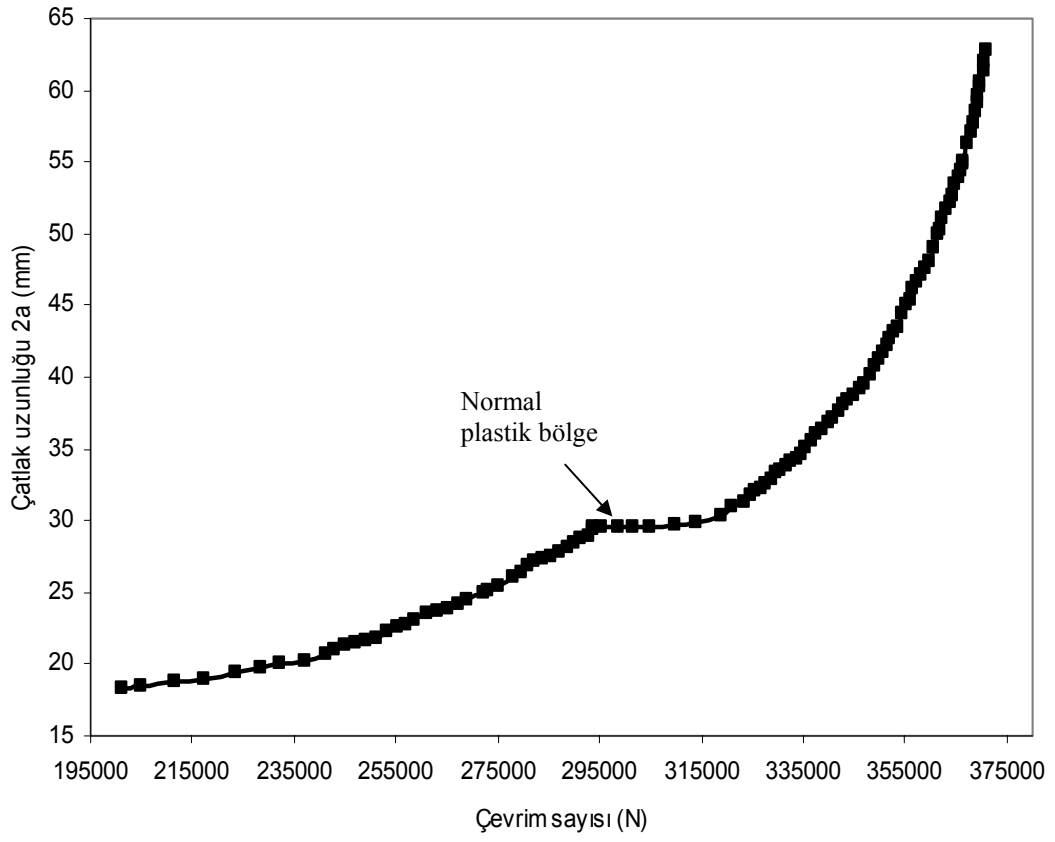
Numune adı	OLR	ULR	$\Delta 2a$ (mm)	$\Delta N$	$N_{top}$	$N_D$	$N_A$
Sabit Genlik	-	-	29-55	306817-364864	58051	-	-
OL	2	-	29-55	256816-331887	75071	17113	-
UL	-	2	29-55	271374-323248	51825	-	6177
UL+OL	2	2	29-55	292838-366512	73674	15623	-
OL+UL1	2	2	29-55	305451-369476	64025	5974	-
OL+UL2	2	1.7	29-55	296500-361126	64626	6575	-
OL+UL3	2	1.4	29-55	286500-360426	73924	15875	-



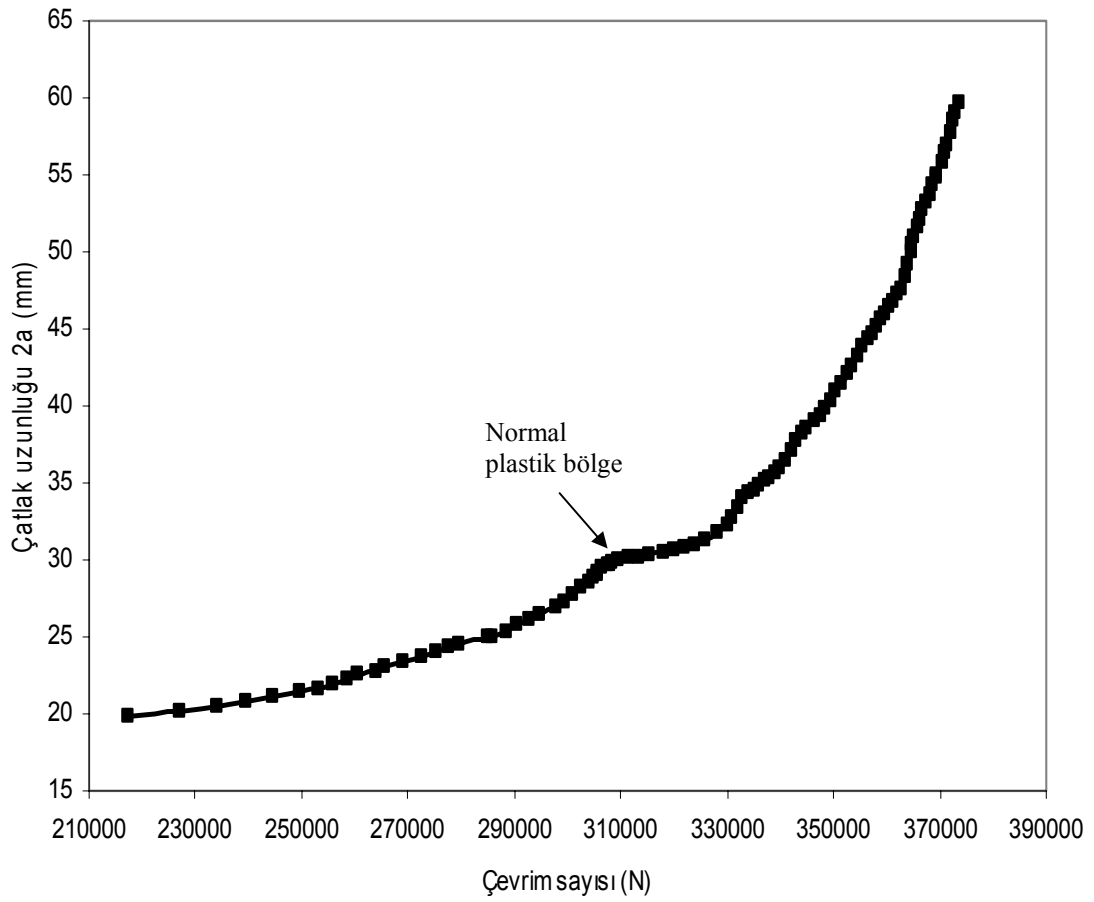
**Şekil 4.3.** Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında pozitif tek aşırı yük (OL) uygulanarak yapılan yorulma deneyinin 2a-N grafiği



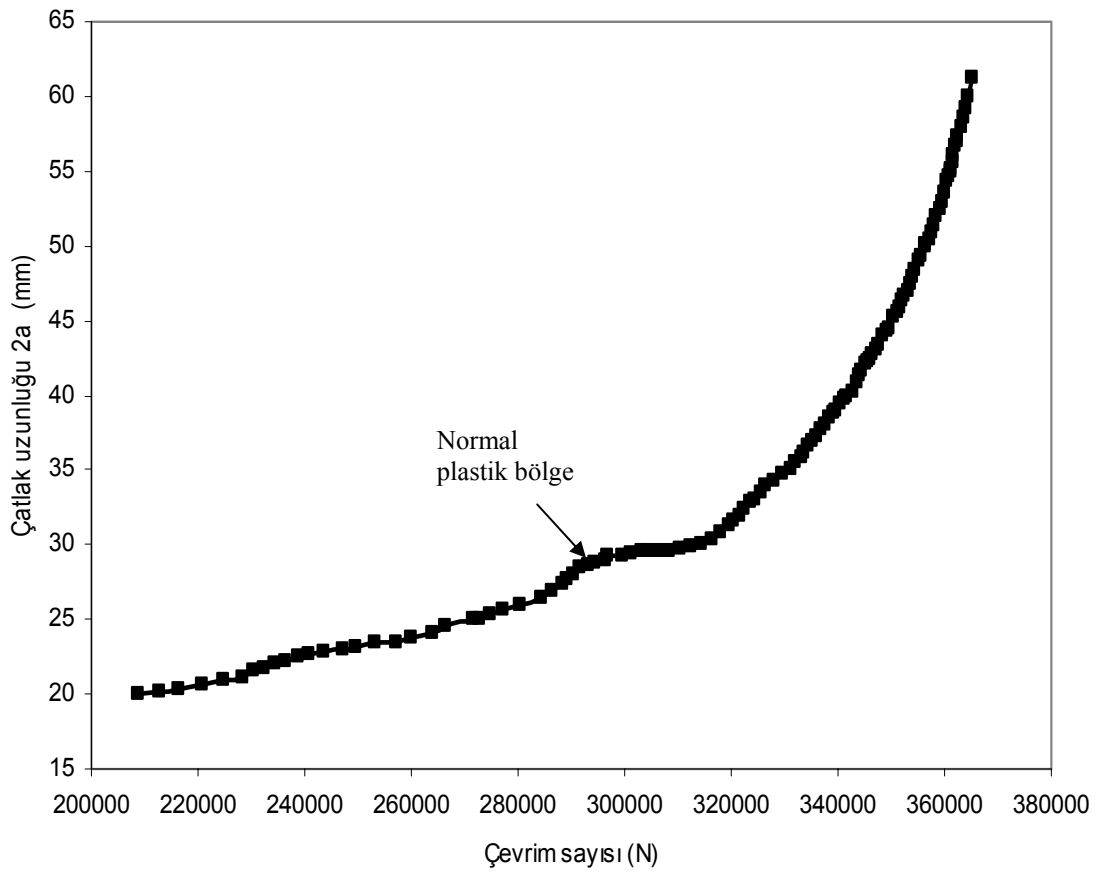
**Şekil 4.4.** Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında negatif tek aşırı yük (UL) uygulanarak yapılan yorulma deneyinin 2a-N grafiği



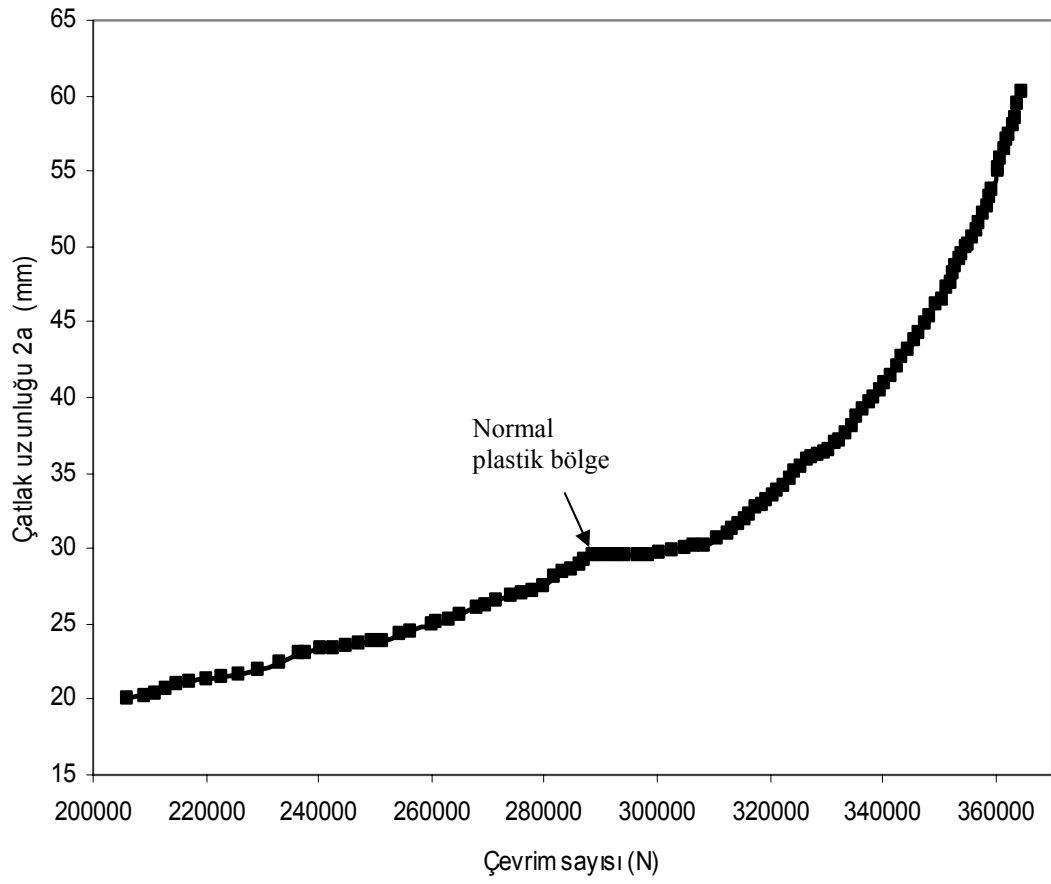
**Şekil 4.5.** Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında ard arda uygulanan negatif tek aşırı yük ve pozitif tek aşırı yük (UL+OL) yorulma deneyinin 2a-N grafiği



**Şekil 4.6.** Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında ard arda uygulanan pozitif tek aşırı yük ve negatif tek aşırı yük (OL+UL1) yorulma deneyinin 2a-N grafiği



**Şekil 4.7.** Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında pozitif tek aşırı yük ile hemen ardından uygulanan 1.7 oranında negatif tek aşırı yük (OL+UL2) yorulma deneyinin 2a-N grafiği



**Şekil 4.8.** Sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve 2 oranında pozitif tek aşırı yük ile hemen ardından uygulanan 1.4 oranında negatif tek aşırı yük (OL+UL3) yorulma deneyinin 2a-N grafiği

## 5. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

### 5.1. Sabit Genlikli Yorulma Deneyi

$R=0.11$ ,  $P_{\max}=27$  kN,  $P_{\min}=3$  kN ve 10 Hz'lik frekansta 2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde yapılan sabit genlikli yükleme altındaki Sabit Genlik yorulma deneyinde çevrim sayısı arttıkça çatlak ilerleme hızının ve çatlak ilerletici faktör olan gerilme şiddet faktörünün arttığı görülmüştür. Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi belli uzunluklar arasında ( $2a=20-55$  mm) Sabit Genlik deneyinde çatlak ilerleme hızı  $7.7 \times 10^{-5}$  -  $1.19 \times 10^{-3}$  mm/çevrim arasında değişmektedir. Aynı uzunluklar arasındaki Gerilme şiddet faktörü ise  $8.16$  MPa  $m^{1/2}$  değerinden başlayarak  $17.24$  MPa  $m^{1/2}$  değerine çıkmaktadır. Diğer deneylerde ise aşırı yük noktalarındaki gerilme şiddet faktörünün ve çatlak ilerleme hızının ani artış gösterdiği Çizelge 5.1'de gösterilmektedir. Gerilme şiddet faktörü, çatlak ucu çevresindeki bölgesel gerilmelerin büyüklüğünü ifade etmektedir ve çatlak ilerletici güç olarak tanımlanır [15]. Yapılan Sabit Genlik deneyinde elde edilen verilerle hesaplanan gerilme şiddet faktörü ve çatlak ilerleme hızı arasındaki ilişki Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Sabit ve değişken genlikli yorulma deneyleri sonucu belirli çatlak uzunluklarındaki çatlak ilerleme hızı ve gerilme şiddet faktörlerinin gösterimi.

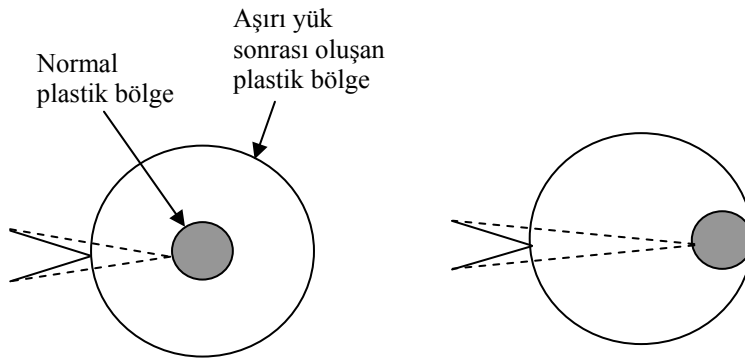
Numune adı	OLR	ULR	da/dN (mm/çevrim)			$\Delta K$ (MPa $m^{1/2}$ )
			20 mm	29 mm	55 mm	29 mm
Sabit Genlik	-	-	$7.7 \times 10^{-5}$	$0.14 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-3}$	10.143
OL	2	-	$5.85 \times 10^{-5}$	$0.76 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-3}$	20.286
UL	-	2	$9.4 \times 10^{-5}$	$1.17 \times 10^{-3}$	$1.94 \times 10^{-3}$	20.286
UL+OL	2	2	$7 \times 10^{-5}$	$0.55 \times 10^{-3}$	$1.46 \times 10^{-3}$	30.429
OL+UL1	2	2	$5 \times 10^{-5}$	$0.82 \times 10^{-3}$	$1.39 \times 10^{-3}$	30.429
OL+UL2	2	1.7	$5.7 \times 10^{-5}$	$0.78 \times 10^{-3}$	$1.54 \times 10^{-3}$	27.386
OL+UL3	2	1.4	$5.2 \times 10^{-5}$	$0.63 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-3}$	24.293



## 5.2. Değişken Genlikli Yorulma Deneyleri

### 5.2.1. Pozitif tek aşırı yük (OL) deneyi

Yapılan değişken genlikli yorulma deneyleri sonunda çatlak ilerlemesindeki en büyük gecikme OL deneyinde gerçekleşmiştir. Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi belli çatlak uzunlukları arasındaki ( $2a=29-55$  mm) çevrim sayıları hesaplandığında, OL deneyinde Sabit Genlik deneyine göre 17113 çevrimlik bir gecikme olmuştur. Aşırı yükten sonraki çatlak ilerleme gecikmesi, genellikle çatlak kapanması veya kalıntı gerilme mekanizmalarıyla açıklanabilen plastik bölgenin boyutuna bağlıdır [28]. Gecikme, aşırı yük sonrasında belli bir periyotta olmaktadır. Bu periyottaki çevrim sayısı, aşırı yükün etkisiyle oluşan plastik bölgenin büyüklüğüne göre değişir. Pozitif aşırı yük oranı yükseldikçe aşırı yük sonrasında oluşan plastik bölgenin büyüklüğü artar. Plastik bölge boyutunun büyük olması çatlak açılma gerilmesini ( $\sigma_{op}$ ) artırır [15]. Çatlak açılma gerilmesinin artması yorulma çatlak ilerlemesinde etkili olan efektif gerilme şiddet faktörünü ( $\Delta K_{eff}=K_{max}-K_{op}$ ) düşürür [29]. Dolayısıyla gecikme çevrim sayısı da artar. Çatlağın sabit genlikli yorulmadaki hızına geri dönmesi için bu bölgeyi geçmesi gerekir. Bunun içinde uygulanan normal gerilmelerin üstünde gerilmelere ya da daha fazla çevrim sayısına gerek vardır. Şekil 5.1’de çatlağın ucunda var olan plastik bölge ve aşırı yük sonunda gerçekleşen daha büyük boyuttaki bir aşırı yük plastik bölgesi gösterilmektedir. Çatlak bu plastik bölgeyi geçinceye kadar gecikme devam eder, plastik bölgenin aşılmasıyla çatlak normal ilerleme hızına geri döner.



Şekil 5.1. Aşırı yük plastik bölgesinin sebep olduğu gecikmenin gösterimi [15]

Birçok araştırmacı gecikmeye en büyük etkinin plastisite sonucu oluşan kapanma olduğunu iddia ederken, çok sayıdaki araştırmacı ise gecikmenin en büyük sebebi olarak basma kalıntı gerilmelerini göstermektedir [22].

Willenborg tarafından geliştirilen çatlak ucu plastisite modeline göre çatlak ilerleme gecikmesine çatlak ucundaki basma kalıntı gerilmeleri sebep olmaktadır. Bu gerilmeler aşırı yük plastik bölgesini çevreleyen elastik kısım tarafından yaratılır. Bu elastik kısım, aşırı yük uygulaması kaldırıldıktan sonra oluşan bölgeye basma kuvveti uygular. Bu basma kuvveti çatlağı kapatmaya çalışır. Böylece çatlak ilerlemesinde bir gecikme olur [15].

2024-T3 alüminyum alaşımının benzeri olan D16Cz alaşımıyla yapılan bir çalışmada, pozitif tek aşırı yük sonrası çatlak ilerlemesinde sabit genlikli yüklemeye göre gecikme olduğu görülmüştür [30].

Bu konuda yapılan başka bir çalışmada ise pozitif tek aşırı yük oranı yükseldikçe gecikme miktarının arttığı görülmüştür [31].

Çatlak ilerleme hızı aşırı yük uygulamasından hemen sonra minimum değere inmez. Çatlak yaklaşık olarak plastik bölgenin 1/8-1/4 arasındaki bir mesafede ilerledikten sonra gecikme gerçekleşir. Bu davranışa ertelenmiş gecikme denir [15]. Yapılan OL deneyinde ertelenmiş gecikme ve bu gecikme periyodundan sonra çatlak ilerleme hızının normale döndüğü gözlenmiştir. Bu durum EK-1'de deney sırasında kaydedilmiş olan verilerden açıkça görülmektedir.

OL deneyinde görülen ertelenmiş gecikme, bu konuda yapılan başka incelemelerde de belirtilmiştir [22,23,29].

### **5.2.2. Negatif tek aşırı yük (UL) deneyi**

Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi UL deneyinde Sabit Genlik deneyine göre 6177 çevrimlik bir hızlanma gerçekleşmiştir. UL'den sonra çatlak ilerlemesindeki artış, çatlak boyunca kalıntı gerilme alanının değişimi ve kapanmanın azalması kavramlarıyla açıklanabilir. OL uygulamasından sonra çatlak ucunda basma kalıntı gerilmeleri oluşur. Bu durumda çatlak ilerlemesinde bir gecikme söz

konusudur. UL uygulamasında ise çentik ucunda çekme kalıntı gerilmeleri oluşur. Oluşan çekme kalıntı gerilmeleri negatif aşırı yükten sonra çatlak ucunda oluşan sıkıştırma kuvvetini yenmeye çalışır. UL değerinin artmasıyla çatlak açılma yükü ( $\sigma_{op}$ ), düşer. Yani çatlak ilerletici unsur olan efektif gerilme şiddet faktörü yükselir. Kapanmanın azalması sonucu çatlak ilerlemesinde bir hızlanma olur [24].

Son 20 yıldaki çalışmalar göstermiştir ki; yorulma yüklemesinde negatif aşırı yükler çatlak ilerleme davranışında önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle pozitif aşırı yüklerin sebep olduğu gecikmeye karşılık, negatif aşırı yüklerin çatlak ilerleme hızında belirgin bir hızlanmaya sebep olduğu gözlenmiştir. Negatif yorulma çevrimlerinin bir çentiğin ucunda kolayca çatlak başlatabileceği ve çatlak ilerlemesine katkıda bulunabileceği bilinmektedir. 1960'lerden beri çentikli sünek metallerde uygulanan tek eksenli negatif yük çevrimlerinin çentik düzlemi boyunca çatlak oluşumuna ve ilerlemesine öncülük edebileceği kabul edilmiştir [32].

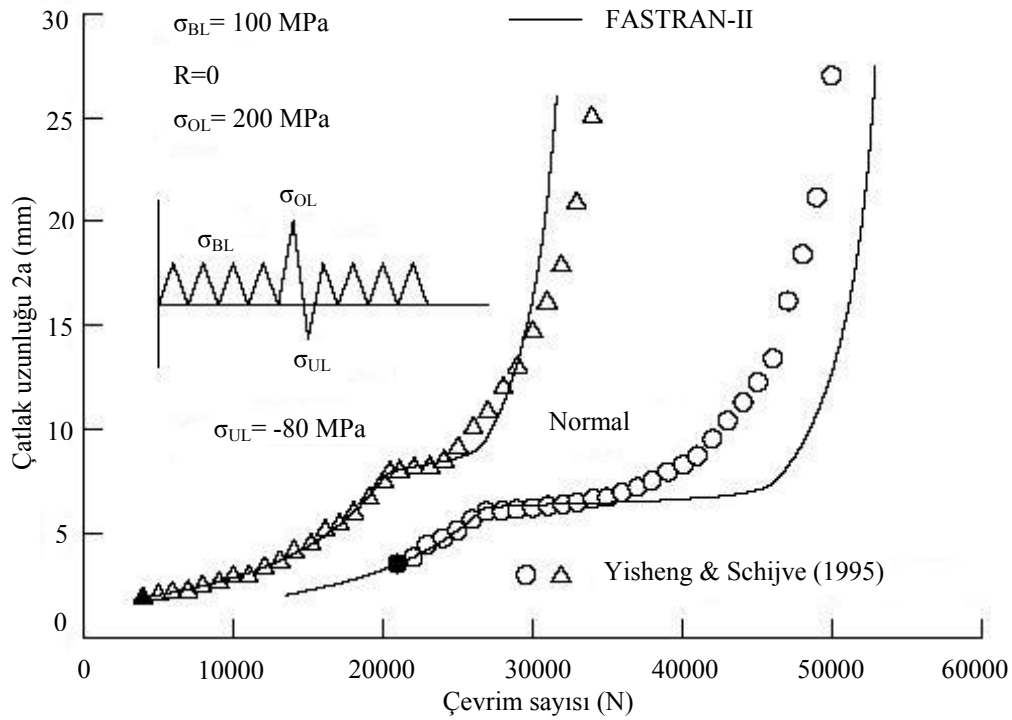
Skorupa'nın [23] yaptığı incelemede, tek eksenli yükleme durumundaki negatif tek aşırı yüklerin 2024-T3 alüminyum alaşımında önemli derecede hızlanmaya sebep olduğu belirtilmiştir.

### **5.2.3. Birbirini takip eden pozitif tek aşırı yük-negatif tek aşırı yük (UL+OL, OL+UL1, OL+UL2, OL+UL3) deneyleri**

Yukarıda bahsedildiği gibi OL uygulamasında çatlak ilerlemesinde gecikme olurken UL uygulamasında hızlanma olmaktadır. Yapılan deneylerde UL'nin OL sonrasında gerçekleşen gecikmeyi azalttığı görülmüştür. OL'den sonra UL uygulanması durumunda, ters plastik deformasyonu oluşur. Bu yüzden OL sonrası oluşan kalıntı basma gerilmeleri düşer. Basma durumundaki bu ters plastik akış, çatlak ucunda malzemenin yan yüzeyinden dışarı doğru ilerler (aşırı yükten hemen sonra malzemede bir kabarıklık olması gibi). Basma yükü sırasında çatlak yüzeylerinin sert bir şekilde sıkışmasından dolayı pozitif aşırı yük bölgesinin gerisindeki kapanma seviyesi düşer. Ters plastik akış bölgesindeki basma kalıntı gerilmeleri çekme gerilmelerine dönüşür. Yorulma çatlağı bu plastik bölgeye

girdiği zaman, çatlak ilerleme hızı çatlak kapanmasındaki azalmadan dolayı artar [29].

2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde yapılan bir incelemede FASTRAN-II programında yapılan tahminlerle Yisheng ve Schijve'nin yaptığı çalışma karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2'deki karşılaştırma pozitif tek aşırı yük sonucundaki gecikmenin negatif aşırı yük uygulamasıyla azaldığını göstermektedir [33]. Şekil 5.2, negatif aşırı yüklerin pozitif aşırı yüklerle etkisini görmek açısından güzel bir örnektir.

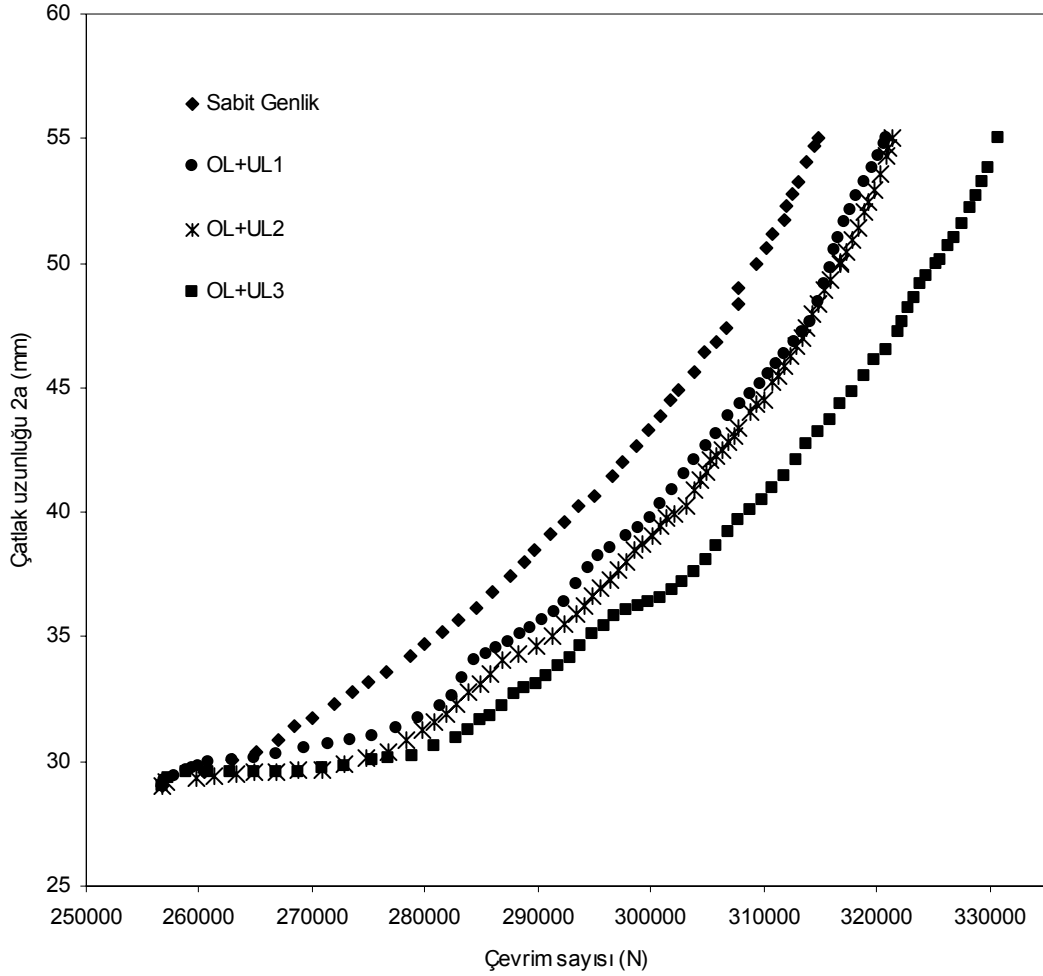


**Şekil 5.2.** 2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde R=0 oranında pozitif tek aşırı yük ve pozitif tek aşırı yükü takiben uygulanan negatif tek aşırı yük durumundaki çatlak ilerlemesinin karşılaştırılması [33]

UL sonrası OL uygulanarak gerçekleştirilen UL+OL deneyinde de UL'nin hızlandırıcı etkisi az da olsa görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçlar Skorupa'nın [23] yaptığı incelemelerle karşılaştırıldığı zaman benzerlik göstermektedir.

Ayrıca OLR=2 oranının sabit tutulduğu deneylerde OL'den sonra gerçekleşen gecikmenin uygulanan UL oranının (ULR) yükselmesiyle azaldığı görülmüştür. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi, yapılan deneylerde gecikmedeki en yüksek azalma OL'den sonra ULR=2 oranının uygulandığı OL+UL1 deneyinde gerçekleşirken, en düşük azalma OL'den sonra ULR=1.4 oranının uygulandığı OL+UL3 deneyinde gerçekleşmiştir.



**Şekil 5.3.** 2024-T3 alüminyum alaşımına ait, R=0.11 oranında gerçekleştirilen değişken genlikli yorulma deneyinde OL'den sonra değişik oranlarda (1.4, 1.7 ve 2) uygulanan UL'nin gecikmeye etkisinin gösterildiği 2a-N grafikleri

Yapılan deneyler sonucu oluşan gecikme çevrim sayıları Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Daha öncede bahsedildiği gibi ULR oranının artmasıyla çatlak açılma yükü ( $\sigma_{op}$ ) düşer. Kapanmanın azalması sonucu çatlak ilerlemesinde bir hızlanma olur [24].

Dawicke'nin [34] 2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde OLR oranı sabit tutularak yaptığı periyodik olarak uygulanan OL+UL deneylerinde ULR oranı arttıkça gecikme çevrim sayısının azaldığı görülmüştür.

Hava araçlarının güvenli ve ekonomik ömürlerinin ne kadar olacağı, hem yapının tasarımı esnasında hem de serviste belirlenmesi gereken önemli bir parametredir. Genelde kırılma, yapıda önceden mevcut olan bir aksaklığın; örneğin imalat esnasında bilinmeden oluşturulan bir çentiğin tekrarlı yükler altında büyümesi (çatlak) ve sonuçta yapının artık yük taşıyamaz hale gelmesi ile ortaya çıkar. Bir yapıda çatlağın mevcudiyeti, yapının mukavemetini azaltır. Çatlak ilerledikçe yapının karşılayabileceği gerilme değeri de düşer. Belirli bir çatlak boyutundan sonra da parça artık yükü taşıyamaz hale gelir ve kırılır [5].

Yapı mukavemetinin müsaade edilebilir bir sınır değerine düşmeden, çatlağın belirli bir boyuta kadar ilerlemesinin önlenmesi gerekir. Müsaade edilebilir çatlak boyutunun ve emniyetli çalışma ömrünün belirlenebilmesi için yapısal mukavemetin çatlaklardan ne şekilde etkilendiğinin araştırılması gerekir. Bunun için ilk olarak çatlakların oluşabileceği kritik bölgeler tespit edilmelidir. Daha sonra yapılan analizler bize çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olan çatlak ilerleme süresi ve yapısal mukavemetle ilgili bilgiler vermelidir. Bu tipteki bir analiz hasar toleransı analizi olarak adlandırılır [8].

Uçaktaki yorulma açısından kritik bölgeler, ya kırılması durumunda uçuş emniyetini tehlikeye sokan parçalardır, ya da bakım işlemi oldukça zor olan parçalardır. Bu bölgelere örnek olarak kanat gövde bağlantı noktaları, iniş takımları ve motor bağlantı noktaları verilebilir. Bu bölgelerin tespitinde uygulanan yöntemlerden bir tanesi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilen yorulma deneyleridir [5]. Yorulma deneylerinde kritik parçaların uçuş esnasında karşılaşılabileceği yükler uygulanarak çatlak ilerleme hızları belirlenir. Bu yükler bazı durumlarda (kalkış, iniş, fırtınalı hava gibi) uçak yapısına (örneğin kanatlara) normalin altında veya üstünde gelebilen aşırı yüklerdir. Bu tür yükler göz önüne

alınarak yapılan yorulma deneylerinde çatlak ilerleme davranışları belirlenerek kontrol aralıkları seçilir.

Bu tür yük durumlarında çatlak ilerleme hızında önemli derecede artış ya da azalmalar olduğu birçok çalışmada görülmüştür [23,30,34].

## 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Genel Sonuçlar

2024-T3 alüminyum alaşımı üzerinde yapılan sabit ve değişken genlikli yorulma deneylerinde çatlak ilerleme davranışları incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda çeşitli yük kombinasyonları ve aşırı yük oranlarındaki çatlak ilerleme hızları birbiriyle karşılaştırılmıştır.

1. 2024-T3 alüminyum alaşımı ile yapılan sabit genlikli yorulma deneyi sonunda çatlak ilerleme hızı ( $da/dN$ ) ve gerilme şiddet faktörü ( $\Delta K$ ) arasında aşağıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$\frac{da}{dN} = 5 \times 10^{-5} (\Delta K)^{3.53}$$

2. Sabit genlikli yükleme üzerine uygulanan negatif tek aşırı yük (UL), çatlak ilerlemesinde bir hızlanmaya sebep olurken, diğer değişken genlikli yorulma deneylerinde ise, uygulanan yük kombinasyonu ve aşırı yük oranına bağlı olarak gecikmeler olmuştur.
3. Çatlak ilerlemesinde maksimum gecikme pozitif tek aşırı yük (OL) deneyinde gerçekleşmiştir. UL ve OL'nin birlikte uygulanmasında ise, UL'nin OL sonucu gerçekleşen gecikmeleri azalttığı görülmüştür. Negatif aşırı yük oranı (ULR) arttıkça OL'nin sebep olduğu gecikmenin azaldığı görülmüştür.
4. UL dışındaki diğer değişken genlikli yorulma deneylerinde aşırı yükün uygulandığı noktada kırık yüzeylerde gözle görülebilecek izler oluşmuştur.



## 6.2. Öneriler

1. Yapılan değişken genlikli yorulma deneylerinde aşırı yükler periyodik olarak uygulanabilir.
2.  $R=0.11$  oranında yapılan deneyler değişik gerilme oranlarında yapılarak çatlak ilerleme hızındaki değişimler incelenebilir.
3. Uygulanan aşırı yük oranları artırılarak çatlak ilerleme davranışı incelenebilir.
4. Aynı deneyler değişik malzemeler üzerinde yapılarak kırılma toklukları karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] GÜLEÇ, Ş. ve ARAN, J., *Malzeme bilgisi*, Tügam Matbaası, Gebze, Türkiye (1985).
- [2] ONARAN, K., *Malzeme bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, Türkiye (1993).
- [3] CANDAN, B. ve KARAKOÇ, T. H., *Uçak Yapısal Bütünlük Programı F-4 uçağı için bir uygulama*, Birinci Havacılık Sempozyumu, Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Bildiriler Kitabı, Kayseri, Türkiye, 357-364 (1996).
- [4] SCHIJVE, J., Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art, *Int. J. Fatigue*, **25**, 679-702 (2003).
- [5] CANDAN, B. ve KARAKOÇ, T. H., *Hava Uzay Yapılarında Ömür Tahmini*, İkinci Havacılık Sempozyumu, Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Bildiriler Kitabı, Kayseri, Türkiye, 399-404 (1998).
- [6] KAYALI, E. S., ENSARİ, C. ve DİKEÇ, F., *Metalik malzemelerin mekanik deneyleri*, Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul, Türkiye (1984).
- [7] KINIKOĞLU, N. G., *Malzeme bilimi ve mühendisliği*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye (2001).
- [8] BROEK, D., *The Practical Use of Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, (1989).
- [9] SCHIJVE, J., *Fatigue crack growth under variable-amplitude loading*, *Metals Handbook Volume 19*, ASM International Handbook Committee, USA, 110-133 (1996).
- [10] ANTOLOVICH, S. D. ve SAXENA, A., *Fatigue failures*, *Metals Handbook; 9th edition Volume 11: Failure analysis and prevention*, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA 102-135 (1986).
- [11] POLÁK, J., *Models of fatigue crack initiation*, *Metallic Materials*, **36**, 133-232 (1998).
- [12] ELLYIN, F., *Fatigue damage, crack growth and life prediction*, Chapman & Hall, London, (1997).

- [13] BROEK, D., *Elementary engineering fracture mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands (1984).
- [14] EWALDS, H. L. ve WANHILL R. J. H., *Fracture mechanics*, Edward Arnold Ltd., (1984).
- [15] BANANTINE, J. A. ve COMER, J. J., *Fundamentals of metal fatigue analysis*, Prentice-Hall Inc., USA (1990).
- [16] CARLSON, R. L. ve KARDOMATEAS, G. A., *An introduction to fatigue in metals and composites*, Chapman and Hall, UK, (1996).
- [17] ANDERSON, T. L., *Fracture mechanics, fundamentals and applications*, 2nd ed., Boca Raton, Flo., CRC Press, USA (1995).
- [18] DOWLING, E. N., *Mechanical behavior of materials*, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey, USA (1993).
- [19] LAIRD, C., *Fatigue failures*, Metals Handbook Desk Edition, (Ed: BOYER, H.E., GALL, T.L.), American Society for Metals, Ohio, USA, 32.13-32.17 (1985).
- [20] TETİK, D., *2024-T3 Alüminyum alaşımının simüle edilmiş uçuş yükleri altında yorulma davranışı*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (1999).
- [21] CALLISTER, W. D., *Materials science and engineering an introduction*, 4th ed., New York, USA (1997).
- [22] SADANANDA, K., VASUDEVAN, A. K., HOLTZ, R. L. ve LEE, E. U., *Analysis of overload effects and related*, Int. J. Fatigue, 21, 233-246 (1999).
- [23] SKORUPA, M., *Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading-a literature review. Part I: empirical trends*, Fatigue, Fracture of Engineering Materials and Structures, 21, 987-1006 (1998).
- [24] SKORUPA, M., *Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading-a literature review. Part II: qualitative interpretation*, Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 22, 905-926 (1999).
- [25] HATCH, J. E., *Alumunium: properties and physical metelurgy*, American Society For Metals, Ohio, (1984).

- [26] ROBERTA, A., *Standart test method for constant-load-amplitude fatigue crack growth rates above  $10^{-8}$  mm/cycle*, ASTM E-647, Annual Book of ASTM Standards Metals Test Methods and Analytical Procedures, **03.01**, 739-759, (1985).
- [27] YUEN, B. K. C. ve TAHERİ, F., *The effects of loading frequency, tensile overload and compressive underload on the fatigue crack propagation behavior of polymethyl methacrylate*, *Polymer Testing*, **23**, 491-500 (2004).
- [28] MEGGIOLARO, M. A. ve CASTRO, J. T. P., *On the dominant role of crack closure on fatigue crack growth modeling*, *Int. J. Fatigue*, **25**, 843-854 (2003).
- [29] MAKABE, C., PURNOWIDOBBO, A. ve McEVILY, A. J., *Effects of surface deformation and crack closure on fatigue crack propagation after overloading and underloading*, *Int. J. Fatigue*, **26**, 1341-1348 (2004).
- [30] SCHIJVE, J., SKORUPA, M., SKORUPA, A., MACHNIEWICZ, T. ve GRUSZCZYNSKI, P., *Fatigue crack growth in the aluminium alloy D16 under constant and variable amplitude loading*, *Int. J. Fatigue*, **26**, 1-15 (2004).
- [31] BORREGO, L. P., FERREIRA, J. M., CRUZ, J. M. ve COSTA, J. M., *Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure*, *Engineering Fracture Mechanics*, **70**, 1379-1397 (2003).
- [32] VASUDEVAN, A. K. ve SADANANDA, K., *Analysis of fatigue crack growth under compression-compression loading*, *Int. J. Fatigue*, **23**, 365-374 (2001).
- [33] NEWMAN, J. C., *Prediction of crack growth variable-amplitude loading in thin-sheet 2024-T3 aluminium alloys*, NASA Langley Research Center, Virginia, USA (1997).
- [34] DAWICKE, D. S., *Overload and underload effects on the fatigue crack growth behavior of the 2024-T3 aluminium alloy*, NASA Contractor Report 201668, Virginia (1997).

## EK-1. DENEY VERİLERİ

1.  $R=0.11$  ve 10 Hz frekansta sabit genlikli yükleme altında yapılan Sabit genlik adlı yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a (mm)	N (çevrim)
19.658	230500
20.15	237500
20.536	242500
21.164	249500
21.834	256500
22.296	261500
22.714	266500
23	269467
23.892	276500
25	284431
25.326	286500
26.118	292500
26.856	295000
27.3	298000
28.09	301000
28.444	303500
28.842	305500
29	306817
29.552	310500
30.056	313000
30.41	315000
30.82	317000
31.398	318500
31.744	320000
32.326	322000
32.756	323500
33.204	325000
33.598	326500
34.192	328750
34.696	330000
35.206	331500
35.642	333000
36.192	334500
36.838	336000
37.422	337500
38.006	338750
38.516	339750
39.114	341000
39.65	342250

40.228	343500
40.69	345000
41.482	346500
42.046	347500
42.656	348750
43.342	349750
43.84	350750
44.526	351750
44.944	352500
45.668	353750
46.402	354750
46.866	355750
47.4	356750
48.344	357750
48.968	358000
50	359248
50.614	360250
51.146	360750
51.758	361750
52.304	362000
52.794	362500
53.286	363000
54.072	363750
54.67	364500
55	364868
56.056	365750
56.658	366250
57.432	366750
58.196	367250
58.638	367750
59.468	368250
60.496	368750
61.494	369500
62.196	370000
63.112	370500
63.988	370750
64.728	371250
65.686	371500
66.882	372000

2. R=0.11 oranındaki sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve pozitif aşırı yük oranı 2 olan OL isimli yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a (mm)	N (çevrim)
18.034	145000
18.264	148000
18.558	151750
18.858	157500
19.294	162000
19.512	165000
19.708	168500
19.84	172000
20.074	176000
20.264	179750
20.482	184500
20.702	187750
20.864	192000
21.096	197000
21.336	202750
21.564	207250
22.088	210250
22.308	213250
22.578	215250
22.846	217250
23	219175
23.392	222250
23.64	225250
24.064	228250
24.398	232250
25	235553
25.262	237250
25.636	239250
25.938	241750
26.354	243750
26.658	245750
26.952	247750
27.306	249750
27.618	251750
28.026	253500
28.384	254500
28.66	255750
28.982	256750
29	256816
29.406	257250
29.406	264750
29.42	269750

29.43	274750
29.53	279750
29.928	282750
30.242	284250
30.658	285750
31.004	287250
31.43	288750
31.89	290250
32.396	291750
32.908	293250
33.438	294750
33.908	296250
34.362	297750
34.774	298750
35.164	300250
35.59	301750
36.064	303250
36.444	304250
36.826	305250
37.2	306250
37.632	307250
38.25	308750
38.684	309750
39.1	310750
39.39	311750
40.062	312750
40.504	313750
40.826	314750
41.178	315500
41.768	316000
42.314	316500
42.67	317000
42.99	317500
43.238	318250
43.634	319000
44.026	319750
44.546	320500
45.068	321250
45.536	322000
46.038	322750
46.594	323500
47.072	324250
47.69	325000

48.12	325500
48.676	326000
49.062	326500
50	327483
50.016	327500
50.5	328000
50.882	328500
51.43	329000
52.006	329500
52.55	330000
53.186	330500
53.88	331000
54.486	331500
55	331887
55.802	332500

3. R=0.11 oranındaki sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve negatif aşırı yük oranı 2 olan UL isimli yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a (mm)	N (çevrim)
20.1	196250
20.622	201750
20.964	205250
21.46	209750
21.642	214250
21.794	217000
22.004	219500
22.252	223000
22.728	226250
23	227551
23.43	230000
23.602	232000
23.806	234250
24.048	236000
24.31	237750
24.496	242250
24.7	244250
25	246583
25.148	247750
25.294	250000
25.388	251750
25.48	253250
25.654	256000
25.976	259000
26.372	262000
27.244	265000
27.666	266000
27.916	267000
28.246	268000
28.466	269000
28.694	270500
29	271374
29.56	271850
29.932	273000
30.606	275000
31.178	276750
31.656	277500
32.06	278250
32.246	279250
32.326	280250
32.498	281500
32.696	282500

32.914	283500
33.026	284500
33.244	285500
33.576	287000
34.068	288250
34.546	289500
35.05	290000
35.528	290500
35.902	291000
36.34	291500
36.68	292250
37.082	293000
37.384	293750
37.738	295000
37.95	296500
38.126	297750
38.426	299000
38.678	300000
38.882	301000
39.136	302000
39.52	303000
40.128	304000
40.834	305000
41.428	305750
41.968	307000
42.512	308000
43.042	308750
43.666	309250
44.22	310000
44.658	310750
44.93	311500
45.568	312250
46.092	313000
46.68	313750
47.238	314500
47.76	315000
48.262	315500
48.884	316250
49.27	317000
50	318344
50.086	318500
50.46	319000
50.906	319500

51.414	320000
51.758	320500
52.102	321000
52.566	321750
53.412	322500
53.898	322750
54.18	323000
54.568	323150
55	323248
55.296	323750
55.558	324000
56.05	324500
56.51	324750
57.142	325250
57.698	325750
58.358	326250
59	326750
59.756	327250
60.488	327750
61.48	328250
62.124	328500
62.688	328750

4. R=0.11 oranındaki sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve pozitif ve negatif aşırı yük oranları 2 olan UL+OL isimli yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a(mm)	N (çevrim)
18.284	201100
18.544	205100
18.724	211600
18.95	217100
19.432	223600
19.74	228600
20.006	232350
20.218	237100
20.734	241100
20.97	243100
21.288	245100
21.458	247100
21.682	249100
21.862	251100
22.3	253100
22.54	255100
22.782	257100
23	258703
23.478	261100
23.65	263100
23.844	265100
24.18	267100
24.55	269100
25	272201
25.098	273100
25.434	275100
26.048	278100
26.368	279600
26.804	280850
27.118	282100
27.282	283850
27.492	285600
27.766	287100
28.152	288600
28.472	290100
28.754	291350
29	292838
29.366	293500
29.508	293650
29.61	295350
29.618	298600
29.618	301350

29.618	304850
29.786	309850
29.858	314100
30.416	318850
30.998	320850
31.328	323600
31.694	324600
32.064	325600
32.252	326600
32.55	327600
32.894	328600
33.292	329600
33.55	330600
33.828	331600
34.156	332600
34.372	333600
34.672	334600
35.04	335600
35.594	336600
36.062	337600
36.418	338850
36.816	339850
37.204	340850
37.674	341850
38.06	342850
38.364	343850
38.662	345100
39.22	346100
39.602	347100
40.102	348100
40.796	349100
41.33	349850
41.698	350600
42.266	351350
42.686	352100
43.102	352850
43.528	353600
44.356	354350
44.988	355100
45.41	355850
46.164	356600
46.656	357350
47.088	358100

47.578	359100
48.08	359850
48.95	360600
50	361514
50.288	361850
51.142	362350
51.646	363100
52.122	363850
52.634	364350
53.394	364850
53.992	365350
54.348	365850
54.796	366350
55	366512
56.224	367350
57.166	367850
57.73	368350
58.492	368850
59.168	369100
59.67	369350
60.22	369600
60.62	369850
61.35	370350
61.924	370600
62.804	371100



5. R=0.11 oranındaki sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve pozitif ve negatif aşırı yük oranları 2 olan OL+UL1 isimli yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a (mm)	N (çevrim)
19.842	217500
20.126	227000
20.482	234000
20.768	239500
21.086	244500
21.378	249500
21.588	253000
21.96	256000
22.272	258500
22.534	260500
22.822	264000
23	265712
23.362	269250
23.686	272500
24.058	275500
24.31	277500
24.54	279500
25	285122
25.068	285750
25.342	288500
25.788	290500
26.18	292750
26.46	294750
26.956	298000
27.326	299500
27.73	301000
28.218	302500
28.604	304000
28.854	305000
29	305451
29.248	305750
29.436	306500
29.632	307500
29.726	308000
29.852	308500
29.942	309500
30.086	311500
30.158	313500
30.32	315500
30.516	318000
30.72	320000
30.83	322000

30.994	324000
31.344	326000
31.732	328000
32.186	330000
32.662	331000
33.346	332000
34.032	333000
34.308	334000
34.514	335000
34.786	336000
35.086	337000
35.336	338000
35.684	339000
36.036	340000
36.432	341000
37.126	342000
37.734	343000
38.24	344000
38.55	345000
39.082	346500
39.406	347500
39.804	348500
40.296	349500
40.89	350500
41.502	351500
42.136	352500
42.638	353500
43.164	354500
43.828	355500
44.35	356500
44.75	357500
45.16	358250
45.572	359000
45.984	359750
46.374	360500
46.828	361250
47.22	362000
47.66	362750
48.448	363500
49.194	364000
50	364577
50.564	364850
51.042	365250

51.614	365750
52.156	366250
52.726	366750
53.254	367500
53.786	368250
54.286	368750
54.768	369250
55	369476
55.858	370500
56.374	371000
57.006	371500
57.694	372000
58.568	372500
59.068	373000
59.692	373500

6. R=0.11 oranındaki sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve pozitif aşırı yük oranı 2 negatif aşırı yük oranı 1.7 olan OL+UL2 isimli yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a (mm)	N (çevrim)
19.993	208750
20.221	212750
20.387	216500
20.669	220750
20.915	224750
21.161	228250
21.571	230250
21.745	232250
22.061	234250
22.277	236250
22.503	238750
22.677	240750
22.847	243500
23	247178
23.113	249500
23.411	253250
23.539	257000
23.745	260000
24.129	264000
24.549	266500
25	271567
25.071	272750
25.311	274750
25.633	277250
26.011	280250
26.389	284250
26.849	286250
27.329	288500
27.767	289250
28.085	290500
28.403	291750
28.615	293000
28.789	294250
29	296500
29.195	296750
29.313	299500
29.449	301000
29.515	303000
29.573	304500
29.597	306500
29.629	308500
29.661	310500

29.917	312500
30.117	314500
30.413	316500
30.867	318000
31.257	319500
31.599	320500
31.911	321500
32.335	322500
32.809	323500
33.083	324500
33.533	325500
34.031	326500
34.323	328000
34.671	329500
34.997	331000
35.521	332000
35.913	333000
36.237	333750
36.621	334500
36.921	335250
37.271	336000
37.717	336750
37.993	337500
38.497	338250
38.755	339000
39.035	339750
39.425	340500
39.753	341000
39.925	341750
40.235	342750
40.857	343500
41.299	344000
41.603	344500
42.059	345000
42.289	345500
42.507	346000
42.819	346500
43.055	347000
43.413	347500
44.033	348500
44.327	349000
44.515	349750
45.209	350500

45.499	351000
45.897	351500
46.279	352000
46.683	352500
46.977	353000
47.393	353500
47.973	354000
48.393	354500
48.947	355000
49.317	355500
50	356445
50.037	356500
50.483	357000
50.945	357500
51.401	358000
52.027	358500
52.479	359000
52.935	359500
53.555	360000
54.329	360500
54.629	360750
55	361126
55.153	361250
55.595	361500
56.071	361750
56.619	362000
57.047	362250
57.355	362500
57.905	363000
58.579	363500
59.193	364000
60.033	364500
61.193	365000

7. R=0.11 oranındaki sabit genlikli yükleme üzerine 1 Hz frekans ve pozitif aşırı yük oranı 2 negatif aşırı yük oranı 1.4 olan OL+UL3 isimli yorulma deneyinin kaydedilmiş 2a-N verileri

2a (mm)	N (çevrim)
20.057	206000
20.213	209000
20.379	211000
20.775	213000
20.971	215000
21.133	217000
21.293	220000
21.457	223000
21.715	226000
21.907	229250
22.403	233000
23	236664
23.089	237500
23.323	240250
23.415	242750
23.547	245000
23.681	247250
23.809	249500
23.909	251500
24.307	254250
24.517	256250
25	260135
25.079	261000
25.297	263000
25.551	265000
26.005	268000
26.313	269750
26.599	271500
26.879	274000
27.099	276000
27.239	278000
27.549	280000
28.085	281750
28.381	283250
28.647	284750
29	286500
29.317	287000
29.589	288500
29.589	290500
29.589	292500
29.589	294500
29.589	296500
29.589	298500

29.701	300500
29.797	302500
30.023	305000
30.133	306500
30.243	308500
30.639	310500
30.963	312500
31.293	313500
31.655	314500
31.857	315500
32.215	316500
32.673	317500
32.913	318500
33.139	319500
33.441	320500
33.837	321500
34.187	322500
34.599	323500
35.131	324500
35.467	325500
35.821	326500
36.051	327500
36.211	328500
36.393	329500
36.593	330500
36.917	331500
37.167	332500
37.627	333500
38.109	334500
38.661	335500
39.169	336500
39.715	337500
40.077	338500
40.475	339500
40.969	340500
41.485	341500
42.089	342500
42.707	343500
43.219	344500
43.737	345500
44.331	346500
44.849	347500
45.455	348500
46.127	349500

46.533	350500
47.203	351500
47.639	352000
48.233	352500
48.633	353000
49.167	353500
49.521	354000
50	354922
50.145	355250
50.663	356000
51.025	356500
51.609	357250
52.235	358000
52.713	358500
53.217	359000
53.823	359500
55	360426
55.113	360500
55.753	361000
56.411	361500
57.023	362000
57.399	362500
58.079	363000
58.583	363500
59.403	364000
60.275	364500